

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh malé vodní elektrárny

Project of Small Hydropower Plant

Student: Jan Tomášek

Osobní číslo: TOM0347

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Mojmír Vrtek, Ph. D.

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Tomášek**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3904R016 Technika tvorby a ochrany životního prostředí
Téma: **Návrh malé vodní elektrárny**
Project of Small Hydropower Plant
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh malé vodní elektrárny pro vybranou lokalitu.

Práce bude obsahovat:

1. Rešerši na téma stav a perspektivy využívání vodní energie v ČR. Možnosti využití vodní energie na malých tocích.
2. Popis a analýzu současného stavu, údaje o stávajícím hydropotenciálu vybrané lokality.
3. Návrh výkonových parametrů a skladby malé vodní elektrárny.
4. Energetické, ekonomické a environmentální zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

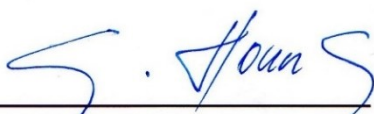
KAMINSKÝ, J., VRTEK, M. *Obnovitelné zdroje energie*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 1998. 102 s. ISBN 80–7078–445–8.
KMINIAK, P. *Vodné mikroelektrárne*. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1990. ISBN 80-05-00771-X.
GABRIEL, P., ČIHÁK, F., KALANDRA, P. *Malé vodní elektrárny*. Praha : ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01812-1.
GULLIVER, J., S., ARNDT, R., E., A. *Hydropower engineering handbook*. 1. vyd. New York: McGraw-Hill, 1991. ISBN 0-07-025193-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

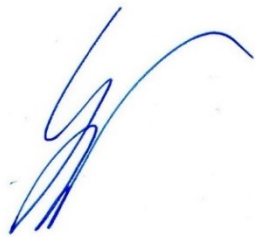
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Mojmír Vrtek, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.
vedoucí katedry

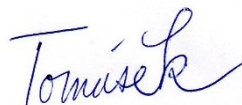



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020.

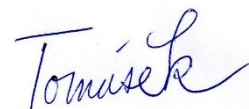
A handwritten signature in blue ink, reading "Tomášek", written over a dotted line.

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.



.....
Podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

TOMÁŠEK, J. *Návrh malé vodní elektrárny: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2020, 50 s. Vedoucí práce: Vrtek, M.

Bakalářská práce se zabývá využitím vodní energie k výrobě elektrické energie a návrhem malé vodní elektrárny pro danou lokalitu. V rešeršní části práce je popsán stav vodní energetiky v České republice a zaměřuje se také na rozdělení stavebních a strojních zařízení malé vodní elektrárny. V praktické části je proveden návrh malé vodní elektrárny na základě hodnot hydropotenciálu vybrané lokality. V posledních kapitolách práce je proveden výpočet produkce elektrické energie, odhad investičních nákladů a ekonomické a enviromentální zhodnocení.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

TOMÁŠEK, J. *Project of Small Hydropower Plant: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy Engineering, 2020, 50 p. Thesis head: Vrtek, M.

The bachelor's thesis deals with the use of hydropower to produce electricity and the design of a small hydropower plant for the specified location. The research part of the thesis describes the state of hydropower in the Czech Republic. It also focuses on division of small hydropower plants. In the practical part, a small hydroelectric power plant is designed based on the hydropotential values of the selected location. In the last chapters of the work, the calculation of electricity production, estimation of investment costs and economic and environmental evaluation are performed.

Obsah

strana

Seznam použitých značek a zkratk.....	8
Úvod	10
1 Zdroje energie	11
1.1 Obnovitelné zdroje energie	11
1.2 Neobnovitelné zdroje energie	12
2 Výroba elektrické energie v České republice	12
2.1 Vodní energetika v ČR	13
3 Vodní elektrárny	13
3.1 Rozdělení vodních elektráren	14
3.1.1 Rozdělení podle charakteristiky.....	14
3.1.2 Rozdělení podle výšky spádu	15
3.1.3 Rozdělení podle instalovaného výkonu	15
3.2 Hydroenergetický potenciál	15
4 Malé vodní elektrárny	16
4.1 Rozdělení malých vodních elektráren.....	16
4.1.1 Podle instalovaného výkonu	16
4.1.2 Podle umístění strojovny	16
4.2 Základní parametry MVE	17
4.2.1 Spád	17
4.2.2 Průtok.....	17
5 Stavebně hydraulická zařízení MVE	17
5.1 Vtokové objekty.....	18
5.1.1 Tlakové vtokové objekty	18
5.1.2 Beztlakové vtokové objekty.....	18
5.1.3 Speciální vtokové objekty.....	18
5.2 Česle.....	18
5.2.1 Hrubé česle	19
5.2.2 Jemné česle	19
5.3 Přivaděče a odpady	19
5.3.1 Beztlakové přivaděče a odpady	20
5.3.2 Tlakové přivaděče a odpady	20
6 Strojní zařízení MVE.....	20
6.1 Vodní stroje.....	20
6.1.1 Vodní kola.....	20
6.1.2 Vodní turbíny	21
6.2 Převody	25
6.3 Uzávěry.....	26
6.4 Generátory	27

7	Návrh malé vodní elektrárny	27
7.1	Hydropotenciál zadané lokality	27
7.2	Volba turbíny	29
7.3	Určení hodnot z H-Q diagramu	30
7.4	Výpočet průtoků	32
7.4.1	Průtok proudící přes jednu turbínu	32
7.4.2	Průtok toku.....	33
7.4.3	Výpočet teoretického a praktického využitelného průtoku	33
7.5	Určení výkonů z vypočtených průtoků.....	36
7.6	Produkce elektrické energie.....	37
7.6.1	Množství vyrobené energie v jednotlivých intervalech.....	37
7.6.2	Množství vyrobené energie za rok.....	39
7.6.3	Vlastní spotřeba	39
7.7	Odhad investičních nákladů.....	40
7.8	Stanovení doby návratnosti a příjmů	41
7.9	Enviromentální zhodnocení	44
8	Závěr	45
9	Seznam použité literatury	46
10	Seznam obrázků.....	48
11	Seznam tabulek	49

Seznam použitých značek a zkratek

Značka	Veličina	Jednotka
CP	celkový příjem	Kč
DN	doba návratnosti	rok
E_{el}	teoretické množství vyprodukované energie	Wh
E_{elsk}	skutečné množství vyprodukované energie	Wh
$E_{elskrok}$	množství vyprodukované energie za rok	Wh
E_{pr}	provozní energie	Wh
H	jmenovitý spád	m
H_b	hrubý spád	m
IN	investiční náklady	Kč
K_{cr}	součinitel využití instalovaného výkonu	
MIN	měrné investiční náklady	Kč/Wh
N	počet turbín	
P	výkon	W
P_A	hrubý hydroenergetický potenciál	W
P_i	instalovaný výkon	W
P_{max}	maximální výkon	W
P_{min}	minimální výkon	W
Q	průtok	m^3/s
Q_{asan}	asanační průtok	m^3/s
Q_{max}	maximální průtok jednou turbínou	m^3/s
Q_{maxtok}	maximální průtok toku	m^3/s
Q_{min}	minimální průtok jednou turbínou	m^3/s
Q_{mintok}	minimální průtok toku	m^3/s
Q_{pv}	teoretický využitelný průtok	m^3/s
Q_{tv}	průměrný praktický využitelný průtok	m^3/s
$Q_{výběr}$	výběrový průtok	m^3/s
RP	roční příjem	Kč
R_{vp}	roční využití instalovaného výkonu	
T	počet dnů	dny

VC	výkupní cena	Kč
Z	předpokládaná doba životnosti výrobní elektrárny	rok
ZS	zisk	Kč
ΔT	počet dnů v intervalu	dny
a	hodnota na konci osy	
b	hodnota na začátku osy	
dH	hrubý spád elementárního úseku	m
g	tíhové zrychlení	m/s ²
h_{rok}	počet hodin v roce	hod
\dot{m}_s	střední průtok v elementárním úseku	kg/s
r_{mve}	součinitel ročního využití MVE	
t_p	počet turbín v provozu	
v	vzdálenost mezi hodnotami na ose	pixel
x	základ logaritmu	
η	účinnost	
λ	součinitel reakčnosti	
ρ	hustota	kg/m ³

Zkratka	Význam
CO	oxid uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
CO _{2u}	ušetřený oxid uhličitý
MVE	malá vodní elektrárna
NO _x	oxidy dusíku
PM _{2,5}	pevné částice menší než 2,5 μm
PVE	přečerpávací vodní elektrárna
SO ₂	oxid siřičitý
TZL	tuhé znečišťující látky
VE	vodní elektrárna
VOC	těkavé organické látky

Úvod

V současné době se jak u nás, tak ve světě, řeší téma na ochranu životního prostředí. Proto lidstvo přenáší svou pozornost na využití obnovitelných zdrojů energie, které jsou ekologicky čisté a nevyčerpatelné. Jako nejvíce využívané zdroje energie jsou však stále neobnovitelné zdroje. Nejen, že nejsou šetrné k životnímu prostředí z důvodu vytváření emisí, ale časem mohou být vyčerpány. Člověk tak hledá alternativní východisko a začíná se zaměřovat na využívání obnovitelných zdrojů.

Právě vodní energie se řadí mezi obnovitelné zdroje. Tuto energii využívali lidé už ve starověku, kde ji nejprve používali k dopravě a následně k pohonu strojů pomocí např. vodního kola. Později se využívala k výrobě elektrické energie. První vodní elektrárna byla postavena roku 1881 v Anglii na řece Way.

Vodní elektrárna je technologický celek, který přeměňuje energii vody na elektrickou energii. Pracuje s vysokou účinností a zároveň je šetrná k životnímu prostředí ve svém okolí. Významné zastoupení mezi vodními elektrárnami mají právě malé vodní elektrárny (MVE), kterým se v této práci budu věnovat.

Návrh malé vodní elektrárny jako téma bakalářské práce jsem si vybral z toho důvodu, jelikož jsou mi vodní elektrárny sympatické svým způsobem vytváření energie. V rešeršní části práce se budu věnovat vodní energii a jejímu využití. Dále budu rozebírat malou vodní elektrárnu a její zařízení, kde budou popsány vodní turbíny.

V praktické části se budu zabývat návrhem malé vodní elektrárny s hydropotenciálem dané lokality. Využiji informace z rešeršní práce k navržení co nejefektivnější vodní turbíny. Následně navrženou malou vodní elektrárnu vyhodnotím z energetického, ekonomického a environmentálního hlediska.

1 Zdroje energie

Energie se skrývá za veškerým dějem, který se odehrává v našem světě. Energie jako slovo bylo vytvořeno v polovině 19. století z řeckého slova energia (vůle či síla). Energii lidé využívali odjakživa, aniž by si toho byli vědomi. Pomocí svých svalů si stavěli obydlí nebo obstarávali potravu. Rozvoj lidské společnosti proto závisí na dostupnosti různých zdrojů energie.

Zdrojem téměř veškeré energie, která je na Zemi, je Slunce. Alternativní zdroj jako je např. vodní energie, má také svůj původ na Slunci, jelikož sluneční energie představuje hybnou sílu pro koloběh vody. Energii, která je neslunečního původu, dostala Země již při svém vzniku z mateřské mlhoviny. Jedná se o energii rotace Země, energii radioaktivních prvků a deuteria. [1, 2]

Zdroje energie se dělí na primární a sekundární. Primární zdroje jsou přírodní zdroje energie, které člověk doposud netransformoval. Dále se dělí na:

- obnovitelné,
- neobnovitelné.

Sekundární zdroje energie již vznikly lidskou činností. Jedná se o:

- komunální odpad,
- vyjeté oleje,
- skládkové plyny,
- odpadní teplo.[3]

1.1 Obnovitelné zdroje energie

Za obnovitelný zdroj energie považujeme takový zdroj, který se v lidském časovém měřítku přirozeně obnoví. Obnoví se nejen díky slunečnímu záření, ale i pomocí geotermální a slapové energie. Proto uvažujeme, že obnovitelné zdroje jsou tedy nevyčerpatelné. Kromě toho i lidský život je závislý na životnosti Slunce, jelikož právě Slunce pohání téměř veškeré procesy na Zemi. Mezi obnovitelné zdroje energie patří:

- sluneční energie,
- vodní energie,
- větrná energie,
- geotermální energie,
- energie biopaliv,
- energie přílivu (slapová). [3]

Obnovitelné zdroje jsou v současné době velice oblíbené, protože energie ze Slunce nám svítí zadarmo. Dalším důvodem, proč se nyní používají tyto zdroje energie je faktor toho,

že neobnovitelné zdroje energie mají omezené zásoby a zatěžují životní prostředí. Obnovitelné zdroje nezatěžují životní prostředí a neprodukují odpad. Proto se používají stále víc po celém světě. Avšak tyto zdroje mají i své nevýhody. Mezi ně patří menší hustota energie oproti zdrojům neobnovitelným. Taky produkce elektrické energie je nestabilní, protože Slunce svítí jen přes den a větrné elektrárny produkují energii jen tehdy, když fouká vítr. [2, 4]

1.2 Neobnovitelné zdroje energie

Jako neobnovitelný zdroj energie označujeme takový, který dokážeme spotřebovat dřív, než se obnoví. Jedná se o:

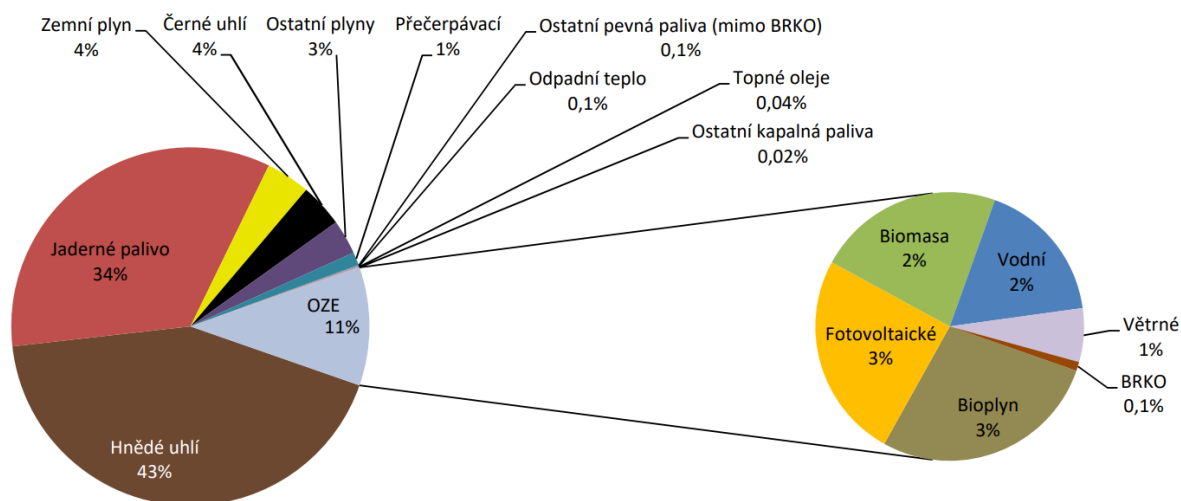
- fosilní paliva (ropa, zemní plyn a uhlí),
- jadernou energii (štěpná reakce uranu a plutonia).

Obnova tohoto přírodního zdroje trvá mnohem déle než u obnovitelných zdrojů, a proto ho považujeme za vyčerpatelný. Lidé odhadují vyčerpání fosilních paliv někdy v tomto století, avšak se stále nalézají nová ložiska, která by toto vyčerpání mohly oddálit o pár let. Abychom i jinak oddálili jeho vyčerpání, je třeba s ním nakládat mnohem šetrněji a efektivněji. Další problém je nepříznivý dopad neobnovitelných zdrojů na životní prostředí, který vzniká jak při samotné těžbě, tak při následném zpracování. Spalováním těchto fosilních paliv vznikají skleníkové plyny a emise, které znečišťují ovzduší. Na snížení těchto negativních vlivů slouží drahá zařízení, která úspěšně redukuje znečištění. Při spotřebě paliva v jaderných elektrárnách zase vzniká jaderný odpad, pro který zatím není žádné využití. Jelikož bývá vysoce radioaktivní, tak nejběžnější způsob je skladování do podzemních nebo hlubinných úložišť. Neobnovitelné zdroje přesto produkují většinu celkové produkce elektrické energie na světě. Může za to větší výtěžnost energie z neobnovitelných zdrojů než z obnovitelných. [4]

2 Výroba elektrické energie v České republice

Při vzniku republiky v roce 1918 byla spotřeba elektřiny na území současné České republiky 1 TWh. Spotřeba elektrické energie v roce 2018 byla 73,9 TWh a výroba překročila 88 TWh. Spotřeba se tedy znásobila 74krát za 100 let. Za tento nárůst může rozvoj hospodářství a ekonomiky. Elektrický proud se dříve využíval hlavně ke svícení. Až jak cena za elektřinu začala klesat, tak díky ní začalo obyvatelstvo topit, vařit, pohánět stroje apod. [6, 7]

Z obrázku (Obr. 2.1) lze tedy vyčíst, že v roce 2018 největší podíl na výrobě elektřiny mělo hnědé uhlí (43 %) a jaderné palivo (34 %).



Obr. 2.1 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny v ČR za rok 2018 [5]

2.1 Vodní energetika v ČR

V České republice má vodní energetika podíl z celkové výroby elektřiny cca 2 %. Můžou za to řeky, které mají nedostatečný průtok vody a nízký spád. V Česku proto slouží vodní elektrárny především jako záložní zdroj, jelikož se využívá jejich schopnost okamžitého najezení a vyrovnání energetické bilance v elektrizační soustavě. V žádném případě nemůžou vodní elektrárny nahradit velký zdroj energie. V roce 2016 bylo v Česku 9 vodních elektráren (instalovaný výkon nad 10 MW), 1 614 malých vodních elektráren (instalovaný výkon do 10 MW) a 3 přecherpacovací vodní elektrárny. Vodní elektrárny měly v roce 2018 celkový instalovaný výkon 753 MW a malé vodní elektrárny 340 MW. Malé vodní elektrárny vyrobily 875,1 GWh. Oproti tomu vodní elektrárny vyrobily 754 GWh. Z toho jde vidět, jaký význam mají i tyto malé zdroje jako jsou malé vodní elektrárny. Přecherpacovací vodní elektrárny měly za rok 2018 celkový instalovaný výkon 1 171,5 MW a vyrobily 1 050,6 GWh elektřiny. [9, 10]

Mezi čtyři největší vodní elektrárny v ČR patří:

- PVE Dlouhé stráně I (výkon 650 MW),
- PVE Dalešice (výkon 475 MW),
- VE Orlík (výkon 364 MW),
- VE Slapy (výkon 144 MW).

3 Vodní elektrárny

Vodní elektrárny vyrábí elektrickou energii pomocí přeměny potenciální energie vody na elektrickou energii. Elektrickou energii vytvoříme tak, že přivedeme vodu na turbínu, která začne rotovat a vytvoří mechanickou energii. Následně se tato energie přemění na elektrickou v generátoru. Tomuto soustrojí vodní turbíny a generátoru se přezdívá

turbogenerátor. Na rozdíl od slunečních nebo větrných elektráren se nemění množství vyrobené energie v závislosti na okamžité změně počasí nebo na změně dne a noci. [11]

Vodní elektrárna je závislá na základních parametrech jako:

- výškový rozdíl dvou vodních hladin (spád).
- a množství průtoku vody.

Spád vytvoříme pomocí jezů, vyšších přehrad nebo v případě přečerpávací vodní elektrárny dvou nádrží (horní a dolní).

3.1 Rozdělení vodních elektráren

3.1.1 Rozdělení podle charakteristiky

- průtočná,
- akumulární,
- přečerpávací,
- slapová. [8]

Průtočná vodní elektrárna funguje bez jakékoli akumulace vody. V tom případě tok vody před elektrárnou a za ní zůstává stejný. Pracuje s nízkým spádem vody, a proto je zcela závislá na množství průtoku vody. Z toho důvodu jsou tyto vodní elektrárny používány pro pokrytí základního zatížení. Průtočná vodní elektrárna se dále dělí na:

- jezovou,
- derivační.

Jezová vodní elektrárna se hodí na nízký spád a velký průtok. Využívá energii vody vzniklou vzduším vody.

Derivační vodní elektrárny využívají tzv. derivačního přivaděče, který zkrátí část řeky a zvětší tím spád. Jedná se o nejjednodušší hydrodynamické dílo. [11]

Akumulační vodní elektrárna využívá přehradu. Přehrazením vodního toku nám vznikne akumulární nádrž. Elektrárna se nachází pod přehradou, která může mít spád až 100 metrů. Tyto elektrárny díky řízenému odběru z nádrže pracují jen několik hodin denně na pokrytí špičkového zatížení v elektrizační soustavě. [10, 11]

Přečerpávací vodní elektrárna využívá dvou nádrží, které jsou od sebe výškově položeny. Tato elektrárna využívá přebytečnou anebo levnější noční energii k přečerpání vody ze spodní nádrže do horní. Stejně jako akumulární tak i přečerpávací pracuje hlavně přes denní špičku. [10, 11]

Slapová neboli přílivová vodní elektrárna pracuje díky mechanické energii přílivu a odlivu. Tato technologie není v současné době moc používána. Může za to omezený počet

míst, kde by se tato elektrárna mohla postavit a její samotná technologická náročnost na výstavbu. [11]

3.1.2 Rozdělení podle výšky spádu

- nízkotlaké (spád do 20 m),
- středotlaké (spád od 20 m do 100 m),
- vysokotlaké (spád nad 100 m). [8]

3.1.3 Rozdělení podle instalovaného výkonu

- malé (výkon do 10 MW),
- střední (výkon do 100 MW),
- velké (výkon nad 100 MW). [8]

3.2 Hydroenergetický potenciál

Hydroenergetický potenciál je veličina, která představuje určité množství celkové energie odtékající vody ve vodním toku. Používá se průměrná hodnota za dobu jednoho roku v kWh. Tato hodnota se využívá k celkovému přehledu vodních toků z hlediska jejich využití. Hydroenergetický potenciál se dělí na hrubý a technicky využitelný. [1]

Hrubý hydroenergetický potenciál se počítá jako součet všech výkonů jednotlivých úseků toku pro střední průtok (3.1). [1]

$$P_A = g \cdot \int_0^H \dot{m}_s \cdot dH [W] \quad (3.1)$$

Kde: g je tíhové zrychlení,

H je hrubý geodetický spád mezi pramenem a ústím,

\dot{m}_s je střední průtok v elementárním úseku trasy jako aritmetický průměr průtoku za delší období,

dH je hrubý spád elementárního úseku toku při středním toku.

Technicky využitelný hydroenergetický potenciál počítá s možnou výstavbou vodní elektrárny na vhodném místě. Tento potenciál nevylučuje odběr vody pro další účely a počítá se ztrátami, které vznikají při transformaci energie. Vyhodnocuje se pomocí střední roční výroby všech vodních elektráren. [1]

V České republice mají malé toky téměř 70 % hrubého hydropotenciálu, takže se dá odhadovat, že se v budoucnu bude pozornost zaměřovat na malé vodní elektrárny. [1]

4 Malé vodní elektrárny

MVE pracují na menších tocích, kde se mění průtok s ohledem na roční období a počasí. MVE bývají vybudovány přímo v průmyslové oblasti nebo v jiných provozech, jelikož se jedná o neekonomičtější zdroj energie. V poslední době mají zájem o malé vodní elektrárny podniky, které můžou využít vyrobenou energii na vlastní potřeby nebo ji můžou prodat do sítě distributorů. MVE jsou rozptýleny po celé ČR, tím pádem se snižují ztráty a celkové zatížení elektrizační soustavy. Potencionální výpadek MVE je tak z hlediska sítě nepodstatný, na rozdíl od výpadku velké elektrárny. [12, 14]

MVE se vyznačují malými provozními náklady, malou poruchovostí, vysokým počtem provozních hodin, takřka bezúdržbovým provozem a neprodukují žádné emise nebo odpady. MVE může mít negativní vliv na ekosystém toku. Problém může nastat při výstavbě elektrárny, kdy se vytvoří překážka, která může narušit přirozenou migraci ryb. Narušení ekosystému může taky nastat v případě velkého odběru vody a nedodržování minimálního průtoku vodního toku. [12, 14]

Za malé vodní elektrárny Evropská unie označuje takové, u kterých je instalovaný výkon menší než 5 MW. Avšak u nás v ČR je tento limit navýšen na 10 MW. V Česku pracuje 90 % MVE právě s instalovaným výkonem větším než 5 MW a menším než 10 MW. [12, 14]

4.1 Rozdělení malých vodních elektráren

4.1.1 Podle instalovaného výkonu

- Průmyslové MVE, které jsou zapojené do elektrizační soustavy v rámci celého státu. Jejich soustrojí mají instalovaný výkon od 1 MW do 10 MW.
- Drobné MVE, se využívají buď v celostátní elektrizační soustavě anebo v tzv. ostrovní síti, kde můžou být použity jako náhradní zdroj v případě přerušení dodávky elektrické energie ze sítě. Jejich instalovaný výkon je od 100 kW do 1 MW.
- Mikrozdroje mají instalovaný výkon od 35 kW do 100 kW.
- Domácí vodní elektrárny se používají většinou ve vyčleněné elektrizační soustavě. S instalovaným výkonem od 35 kW do 100 kW si tyto vodní elektrárny nechávají postavit např. u domu, hotelu apod., kde protéká potok. [2]

4.1.2 Podle umístění strojovny

- hrázové,
- jezové,
- věžové,
- břehové,
- pilířové,

- plovoucí – lodní. [17]

4.2 Základní parametry MVE

Rozhodující parametry pro výstavbu malé vodní elektrárny jsou spád vodního toku a průtok. Poté taky výkon, elektrická energie a účinnost. [13]

4.2.1 Spád

Spád neboli výškový rozdíl mezi dvěma vodními hladinami, který se dá vytvořit pomocí výstavby přehrady, jezu anebo derivačního přivaděče. U MVE by spád měl dosahovat aspoň jednoho metru. Většinou se rozlišují dva typy, a to jsou hrubý a užitný spád.

Hrubý spád H_b (brutto, celkový) je celkový statický spád, který se vypočítá rozdílem hladin při nulovém průtoku MVE. Stanovuje se pomocí odhadu z mapy anebo přesněji pomocí specializovaných služeb. [14]

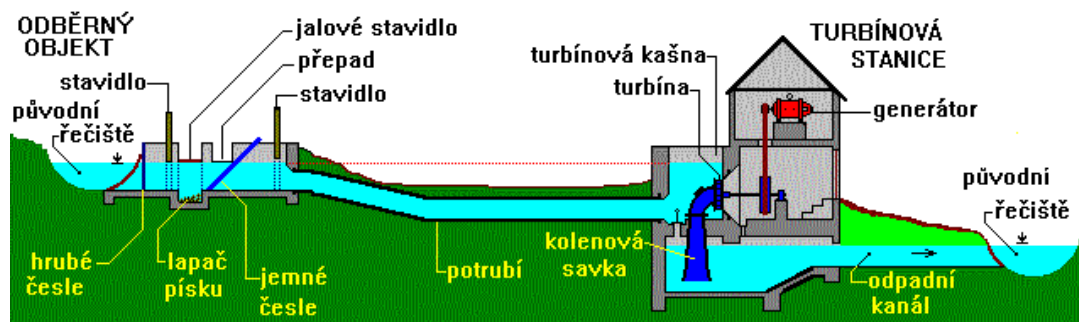
Užitný spád H (netto, čistý) má na rozdíl od hrubého spádu odečteny ztráty, které vznikají v přivaděči a v odpadu. Další ztráty vznikají vlivem poklesu horní hladiny toku, změnou směru toku a objemovými ztrátami. [14]

4.2.2 Průtok

Průtok je průtočné množství vody v daném profilu. Průtok vodního toku se mění v závislosti na počasí a daném ročním období. Ke zjištění průtoku na vodním toku nám slouží odtoková křivka, ze které lze vyčíst průměrný průtok za daný počet dní. Z Českého hydrometeorologického ústavu nebo ze Správy toku se dají zjistit potřebná přesná data a odtokové křivky. MVE se dimenzují nejčastěji na 90-ti až 180-ti denní průměrný průtok. Závisí na technické vybavenosti MVE, zejména na turbíně, jestli se dokáže přizpůsobit změnám průtoku. Pro výpočet využitelného průtoku je taky nutnost počítat s minimálním sanačním průtokem koryta. Sanační (hygienický) průtok bývá předepsaný vodoprávním úřadem a nelze s ním počítat v rámci energetického využití. Obvykle odpovídá 330, 355 nebo 364 dlouhodobému průměru průtoku. Tento minimální zůstatkový průtok umožňuje v rámci možností obecné využívání vodního toku a zachování biologické rovnováhy. [2, 14]

5 Stavebně hydraulická zařízení MVE

Mezi stavebně hydraulická zařízení malých vodních elektráren patří vtokové objekty, lapáky nečistot, přivaděče, odpady a budovy se strojovnou. Jsou to objekty, které jsou nezbytné pro správný provoz MVE. Těmito zařízeními protéká voda a jejich konstrukce byla vytvořena ze stavebních materiálů. [13]



Obr. 5.1 Schéma vodního díla s turbínovou kašnou a tlakovým přivaděčem [17]

5.1 Vtokové objekty

Vtokové objekty slouží k přísunu dostatečného množství vody z vodního toku, nádrže či z derivačního přivaděče. Měl by umožnit regulaci průtoku a zabránit vniknutí nečistot do objektu strojovny, kde je turbína, kterou by větší částice mohly poškodit. Objekt musí zabránit ucpání vtokových česlí, zamezit přísunu vzduchu do hydraulické soustavy a zároveň musí být projektován s co nejnižšími hydraulickými ztrátami. Vtokové objekty můžeme rozdělit na tlakové, beztlakové a speciální. [13]

5.1.1 Tlakové vtokové objekty

U tlakových vtokových objektů celý protékající vtok je zaplněn vodou, protože je ponořen pod hladinu vody. Používají se pro odběr vody do tlakových přivaděčů anebo vedou přímo na turbínu. Bývají opatřeny prahem, jemnými česlemi s podpěrnými prvky. Tlakové vtokové objekty jsou navíc vybaveny zavzdušňovacím potrubím a rychlouzávěrem. [13]

5.1.2 Beztlakové vtokové objekty

Beztlakové mají volnou hladinu vody a voda se přivádí do beztlakových přivaděčů nebo do předpolí tlakových vtoků. Bývají vybaveny prahem, které zachycují nečistoty na dně, nornou stěnou, které zachycují plovoucí nečistoty, a hrubými česlemi. [13]

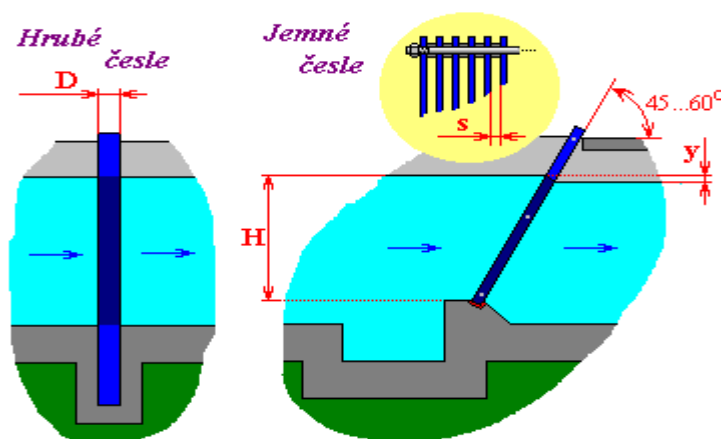
5.1.3 Speciální vtokové objekty

Mezi speciální patří samoobslužné pilířové vtoky, které mají kombinaci hrubých a jemných česlí. Také mezi speciální vtokové objekty patří dnové česlicové objekty, které mají samočisticí schopnost. Dále také sací koše a síta, které jsou nejvhodnější pro mikrozdroje. [13]

5.2 Česle

Česle jsou nutnou výbavou všech hydroenergetických děl. Musí zamezit vniknutí nečistot a předmětů do hydraulického systému, kde by mohly komplikovat provoz snížením výkonu nebo ohrožením rozváděcí nebo oběžné lopatky turbíny. Česle rozlišují na hrubé

a jemné. Každý typ česlí má svoji funkci a liší se od sebe jak konstrukčním provedením, tak uspořádáním. [13]



Obr. 5.2 Schéma hrubých a jemných česlí [17]

5.2.1 Hrubé česle

Hrubé česle chrání zařízení elektrárny především před většími a hmotnými objekty jako jsou např. klacky, ledové kry, plovoucí stromy a podobně velké předměty. Hrubé česle tvoří mříž z vertikálně uložených silnostěnných trubek s průměrem od 80 do 150 mm a roztečí 300 až 600 mm. Konstrukce těchto česlí se musí dimenzovat tak, aby v případě plného ucpání plnila svou funkci a nedošlo k poškození. Čištění česlí probíhá ručně z lávky, která je nad česlem. [13]

5.2.2 Jemné česle

Jemné česle se navrhují pod mírným úhlem, na rozdíl od česlí hrubých. Tento úhel bývá od 60° do 70° od vodorovné roviny v případě ručního čištění. Při použití strojů k čištění může být sklon až 85°. Různé sklony se navrhují tak, aby čištění bylo co nejsnadnější. Vyrábí se nejčastěji z páskové oceli. Problém u jemných česlí je ten, že se dokážou snadno ucpat a vznikají velké hydraulické ztráty. Dochází k tomu většinou při povodních nebo v zimních měsících, kdy česle namrzají a v tocích se tvoří kašovité led. Proto je někdy nutno si u těchto česlí obstarat ohřev. [13]

5.3 Přivaděče a odpady

Přivaděče jsou zařízení, které vedou vodu z vodního toku nebo nádrže do vodní elektrárny. Odpady slouží k odvodu vody zpátky do řeky. Jelikož se snažíme, aby MVE byly z ekonomického hlediska co nejlépe navrženy, tak u nich tyto přivaděče a odpady děláme co nejkratší. Přivaděče a odpady se dělí z hlediska tlakového poměru na beztlakové a tlakové. Z konstrukčního pohledu se dělí na náhony, kanály, potrubí, žlaby, šachty a stoly. Jelikož se počítá s tím, že se u vodních elektráren budou provádět revize a opravy, je zapotřebí, aby jak přivaděč, tak odpad byl vybaven zařízením pro dočasné zahrazení. [13]

5.3.1 Beztlakové přivaděče a odpady

Beztlakové přivaděče a odpady jako jsou náhony, kanály a žlaby se nejvíce využívají právě u MVE, jelikož jsou z finančního hlediska mnohem výhodnější než tlakové. Dělíme je podle konstrukce na zakryté a nezakryté. Problém může nastat tehdy, když začne kanálem prosakovat voda v důsledku nedokonalé vodotěsnosti. Takové prosakování může zapříčinit ztrátu energie, a proto se jim snažíme vyvarovat. [13]

5.3.2 Tlakové přivaděče a odpady

Tlakové přivaděče a odpady se budují zřídka, jelikož jsou dražší a konstrukčně složitější než beztlakové. Nutné jsou tlakové přivaděče u vodních elektráren, kde je Peltonova turbína. Typy přivaděčů jsou potrubí vyrobeny z oceli, litiny, železobetonu nebo plastu. [13]

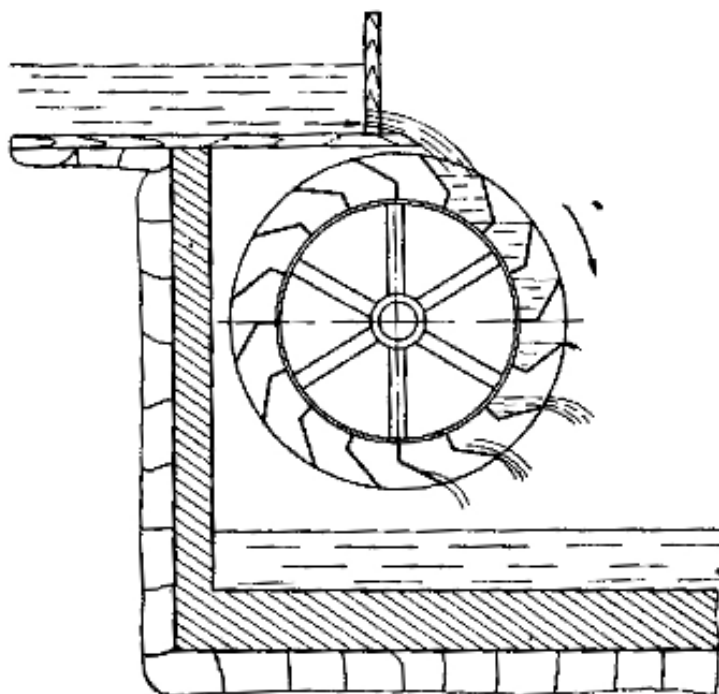
6 Strojní zařízení MVE

6.1 Vodní stroje

Vodní stroj je zařízení, které využívá vodní energie k přeměně na mechanickou energii rotující hřídele. Dělí se na vodní kola, turbíny a ostatní vodní stroje. [13]

6.1.1 Vodní kola

Vodní kola patří mezi nejstarší vodní stroje, které člověk využíval tisíce let. Dělí se podle způsobu využívání energie. Lopatková vodní kola využívají kinetickou energii vody a kola korečková využívají potencionální energii vody. Dále se dělí na horizontální, u které je hřídel vodorovně, a vertikální, která má hřídel uloženou svisle. Horizontální vodní kola se dnes již skoro nevyužívají. Vodní kola mohou dosahovat účinnosti 60 až 80 % a jsou to jediné vodní stroje, které dokážou efektivně využít spády od 0,5 až 1,5 m. Lopatkové vodní kolo dokáže využívat i spád 0,1 m, ovšem s účinností okolo 20 %. Korečková vodní kola mají účinnost okolo 70 %, ale až při spádu nad 3 m, kde se dnes využívají moderní vodní turbíny. Proto se v dnešní době používají spíše lopatková vodní kola. Lopatkové vodní kolo se skládá z bočních věnců, lopatek a hřídele. [13]



Obr. 6.1 Schéma lopatkového vodního kola s horním nátokem [15]

6.1.2 Vodní turbíny

Vodní turbína je točivý mechanický stroj, který přeměňuje hydraulickou energii v mechanickou energii na hřídeli. Turbíny vznikaly z toho důvodu, aby se začala efektivněji využívat kinetická a tlaková energie vody. Vodní turbína je spojena s generátorem, což patří mezi hlavní součásti všech vodních elektráren. [2, 13]

6.1.2.1 Rozdělení vodních turbín

Rozdělení podle přenosu energie:

- Přetlakové (reakční) turbíny, využívající kinetickou i tlakovou energii vody. Tlak vody je před a za oběžným kolem jiný.
- Rovnotlakové (akční) turbíny, využívající převážně kinetickou část vodní energie. Tlak vody u těchto turbín je před oběžným kolem stejný jak za ním.

Hranici mezi akčními a reakčními typy turbín udává součinitel reakčnosti λ . Pokud je λ větší jak 0,5 tak jde o turbínu reakční. Pokud se λ pohybuje od 0 do 0,5 tak se jedná o turbínu akční. [13]

Rozdělení podle průtoku vody oběžným kolem:

- Axiální turbína – voda protéká rovnoběžně s osou oběžného kola (např. turbína Kaplanova).
- Radiálně axiální turbína – voda proudí oběžným kolem nejprve kolmo a potom změní směr a proudí ve směru osy (např. moderní Francisova turbína).

- Diagonální turbína – voda protéká šikmým směrem k ose hřídele (např. turbína Dériazova).
- Tangenciální turbína – voda vstupuje v tangenciálním směru na lopatky oběžného kola (např. turbína Peltonova).
- Turbína s dvojnásobným průtokem – voda vtéká přes lopatky do oběžného kola a potom vytéká zase přes lopatky ven (např. Bánkiho turbína).

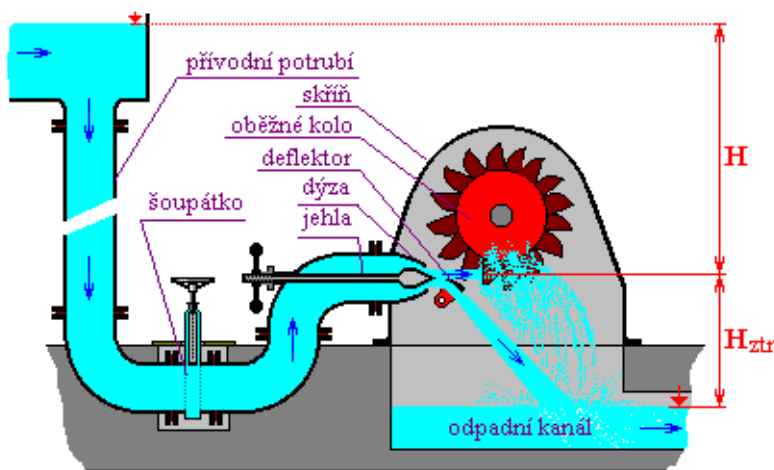
Rozdělení podle polohy hřídele:

- Horizontální – hřídel je uložena vodorovně.
- Vertikální – hřídel je uložena svisle. [2]

6.1.2.2 Peltonova turbína

Peltonova turbína je nejčastěji používaná rovnotlaká turbína, která má tangenciální vstřík. Efektivnost této turbíny závisí na vysokém tlaku vody, proto se využívá hlavně tam, kde je vysoký spád a malý průtok. Voda, která tryská tečně na lopatky oběžného kola z trysek, předá turbíně téměř veškerou svou kinetickou energii. Lopatky mají lžícovitý tvar a jsou na pevno, tudíž se nedají regulovat. Zpravidla je počet lopatek 18 až 26. Turbína se reguluje pomocí jehly v dýze, která se přímočaře pohybuje a tím mění tlak proudu vody. Pokud je potřeba rychle odstavit přívod vodního paprsku na turbínu, slouží k tomu tzv. deflektor nebo deviátor, který ho odkloní nebo odřeže. Turbína je použita ve většině případů jako horizontální. Vertikální uložení mívají jen velké stroje. [2, 15, 18]

Účinnost těchto turbín se pohybuje v závislosti na její velikosti. U malých turbín je účinnost 80 až 85 %, u velkých 85 až 95 %. Turbína je vhodná i pro použití pitné vody, jelikož ložiska jsou uloženy mimo vodu, a tak není nebezpečí jejího znečištění. Rozsah spádu pro použití Peltonovy turbíny je 15 až 1 800 m. Bohužel hydrologické poměry České republiky nejsou dostatečné, a tak není dostatek lokalit, kde by se tato turbína dala použít. [15, 18]

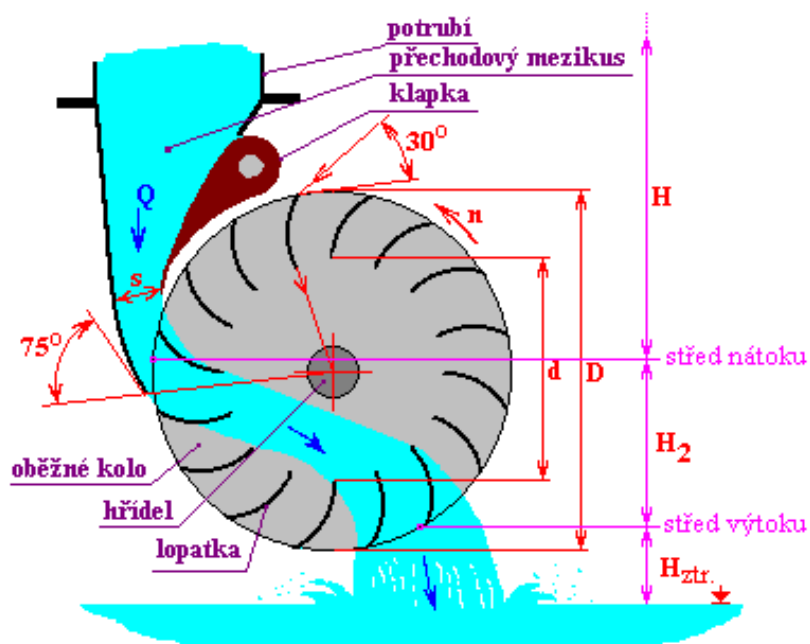


Obr. 6.2 Schéma Peltonovy turbíny [18]

6.1.2.3 Bánkiho turbína

Jedná se o rovnotlakou turbínu s dvojnásobným průtokem. Voda je přiváděna k oběžnému kolu a vtéká přes lopatkovou mříž do prostoru uvnitř oběžného kola. Odtud odtéká zase přes lopatkovou mříž do odpadní šachty nebo savky. Přestože se Bánkiho turbína řadí mezi rovnotlaké turbíny, tak první průtok oběžným kolem je přetlakový a druhý rovnotlaký. Avšak z teoretického hlediska se předpokládá, že i první průtok je rovnotlaký. Z toho důvodu se někdy tato turbína řadí mezi mezní turbíny. Turbína bývá uložena na horizontální hřídeli. Na této turbíně se reguluje průtok a výkon pomocí regulační klapky nebo segmentového uzávěru. [2, 15, 19]

Použití tohoto typu turbíny je oblíbené u malých vodních elektráren hlavně kvůli její konstrukční jednoduchosti. Jelikož je nenáročná na výrobu, tak je ekonomicky výhodnější a pro investory atraktivnější. Počet lopatek bývá 28 až 36 a závisí na velikosti průtoku. Při prvním průtoku vody oběžným kolem se využije asi 73 % vodní energie, ale při druhém už to je pouze 20 %. Účinnost turbíny dosahuje 78 až 84 %. Minimální doporučený spád pro Bánkiho turbínu je 2 m. [15, 19]

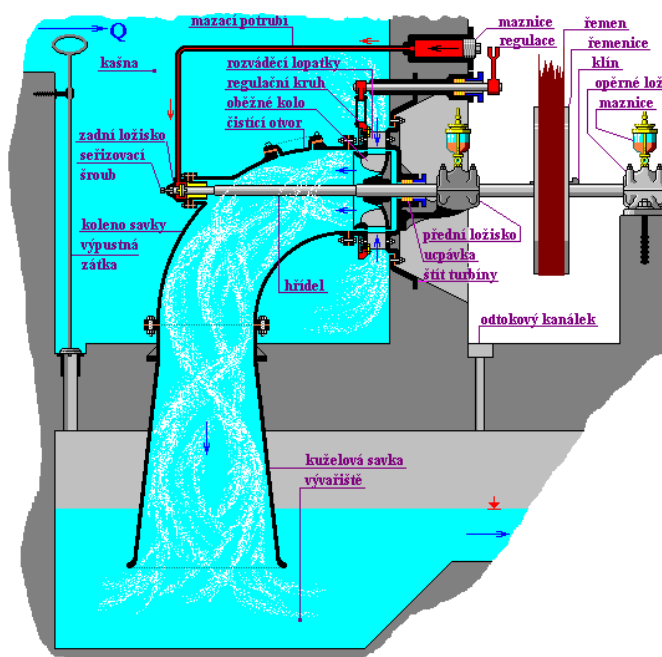


Obr. 6.3 Schéma Bánkiho turbíny [19]

6.1.2.4 Francisova turbína

Francisova turbína je přetlaková turbína, která má dvě možnosti uložení hřídele, a to horizontální a vertikální. Dříve se tyto turbíny používaly u středních spádů a středních průtoků. Mnoho těchto strojů se zachovalo a některé jsou po své rekonstrukci provozovány jako MVE. Dnes se používají na spádech do 8 m a na menších až velkých průtocích v závislosti na velikosti turbíny a jejím uložení. Voda vniká ze spirálové skříně přes rozváděcí lopatky, které jsou na obvodu turbíny. U malých spádů se používá odkrytá kašna.

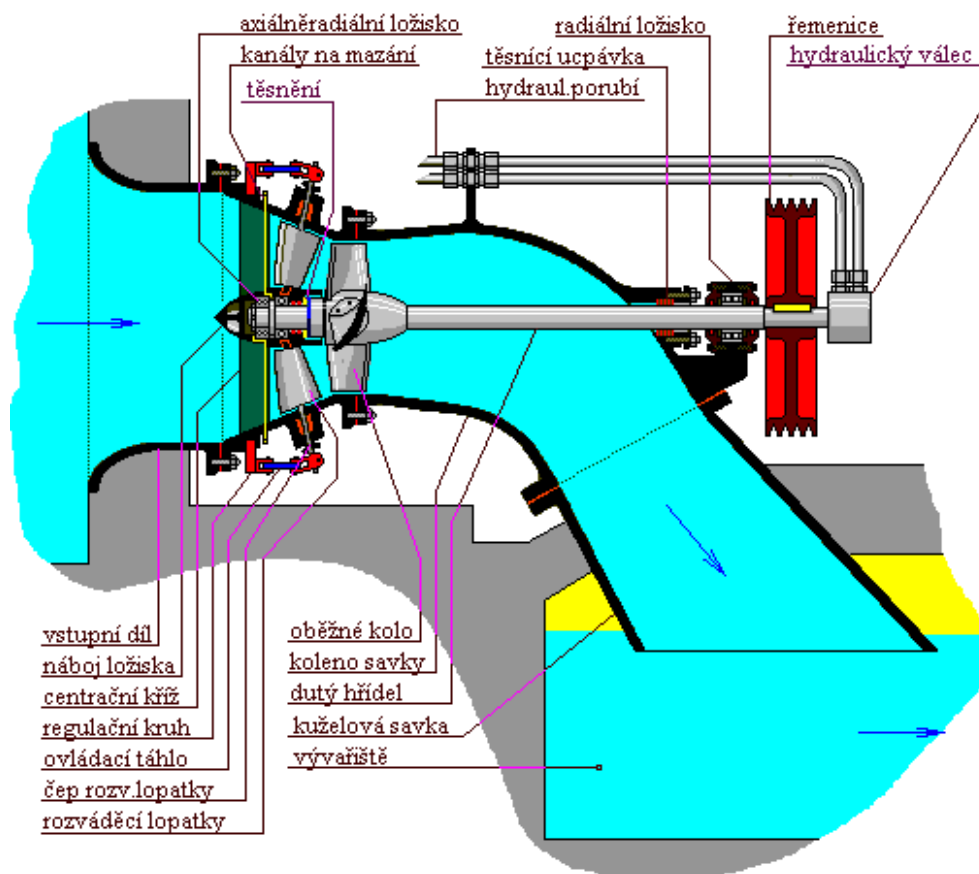
Voda vytéká ven přes savku, kde je vytvořen podtlak. Díky savce je možno turbínu umístit kdekoli nad hladinu spodní vody. Rozváděcí lopatky zároveň fungují jako regulační prvek výkonu díky jejich možnosti natáčení nebo téměř plného uzavření. Rotorové lopatky na oběžném kole se v případě této turbíny nedají regulovat. Účinnost turbíny je cca 90 %. [2, 15, 20]



Obr. 6.4 Schéma Francisovy horizontální turbíny [20]

6.1.2.5 Kaplanova turbína

Kaplanova turbína (S-turbína) je přetlaková axiální turbína. Nejčastěji se používá v nízko spádových vodních elektrárnách s velkým průtokem. Běžně se využívá u spádů 2 až 40 m. Při spádu 30 až 60 m bude mít turbína vysoké otáčky, ale taky je víc náchylná na kavitaci. Turbíny se mohou od různých výrobců lišit svou konstrukcí. Kaplanova turbína často nahrazuje vertikální Francisovou turbínu, protože dokáže lépe využít vodní tok díky své regulovatelnosti. U této turbíny se dají regulovat jak rozvodové, tak i oběžné lopatky. Lopatky změni směr a rychlost vody při vstupu na oběžné kolo. Lopatky jsou vždy v sudém počtu, nejčastěji bývají 4. Nevýhodou tohoto stroje je vysoká mechanická náročnost. Podle toho se odvíjí i vysoká pořizovací cena a její vyšší náklady na údržbu. Proto se používá hlavně tam, kde je to skutečně opodstatněné hydrologickým charakterem. Jinak je mnohem výhodnější použít levnější turbínu s jednodušší regulací. [2, 15, 21]



Obr. 6.5 Schéma Kaplanovy S-turbíny [21]

Vrtulová turbína je zmenšená varianta Kaplanovy turbíny. Právě tyto turbíny nevykazují vysoké výkony s vysokou účinností. Tato turbína slouží pouze jako záložní zdroj elektrické energie při výpadku energie anebo jen pro nouzové rozsvícení osvětlení. Dnes je tento typ turbín poměrně vzácný. V minulosti se tato turbína používala na malých spádech od 1,5 do 4 m, a jejich výkon byl maximálně 1,5 kW. [17]

6.2 Převody

Převody jsou velice důležitou součástí celého technologického zařízení MVE. Práce převodů je přenos výkonu turbíny na generátor. U velkých soustrojí většinou nejsou s tímto přenosem komplikace, protože turbína a generátor jsou spojeny pevnou spojkou. Problém nastává u MVE, protože je velmi neekonomické používat synchronní generátory s velkým počtem pólových dvojic, které by se daly spojit přímo s turbínou. U MVE se proto používá asynchronní generátor s převodem dorychla. Od těchto převodů dorychla je požadována vysoká provozní spolehlivost, dlouhá životnost, vysoká účinnost, malá hlučnost a minimální nároky na údržbu a prostor. Převody se dělí podle základních typů na:

- ozubená soukolí,
- řemenové převody,
- lanové převody,
- řetězové převody. [13]

Ozubená soukolí jsou osvědčeným řešením převodu dorychla. Jejich využití se najde u nízkospádových MVE. Základní druhy ozubených soukolí jsou čelní a kuželové. Účinnost závisí na druhu ozubení, přesnosti výroby, drsnosti povrchu zubů, mazání apod. Účinnost bývá většinou 97 %, ale vlivem opotřebování soukolí může klesnout až na 85 %. Maximální používaná hodnota převodu na jednom stupni je u přímých zubů 1 : 8 a u šikmých 1 : 10. Mnohdy se používá tento převod i v kombinaci s jinými. [13]

Řemenové převody jsou nejrozšířenější převody u vodních elektráren. Jelikož se v dnešní době používají řemeny ve velké míře, tak jejich technologie jde stále kupředu. Moderní řemeny jsou schopny přenášet velké výkony s vysokým stupněm převodu až 1 : 14. Mají vysokou účinnost, dlouho životnost, jsou levné a nehlukné. Řemeny se rozlišují podle typu na ploché, klínové a ozubené.

U plochých řemenů lze v jednom stupni provést převod až 1 : 15. Obvodové rychlosti mohou dosáhnout až 70 m.s^{-1} . Účinnost se v praxi pohybuje okolo 96 %.

Klínové řemeny dokážou přenášet mnohem větší výkony než ploché, avšak jsou náročnější na výrobu. Pro klínové řemeny je doporučený maximální převodový poměr 1 : 10. Dokážou pracovat při vysokých obvodových rychlostech až 60 m.s^{-1} a jejich účinnost může dosahovat až 98,5 %.

Ozubené řemeny jsou technicky nejdokonalejší a využívají se u výkonu do 300 kW. Účinnost dosahuje asi 99 %.[13]

Lanové převody se používaly běžně v minulosti. Lana byly z bavlny, konopí a později se začaly používat ocelové. V dnešní době se lanové převody používají u výtahů, jeřábů, lanovek apod. [13]

Řetězové převody mají zdaleka nejnižší nároky na prostor a nevyžadují předpětí. Mezi základní typy řetězů se řadí článkové, článkové s můstkem, kloubové, Gallovy, válečkové. Pro převody z turbíny na generátor se používají řetězy článkové jednořadé a víceřadé. V jednom stupni dokážou řetězy zrealizovat převodní poměr až 1 : 15. Obvodová rychlost se může volit až 20 m.s^{-1} . Účinnost těchto převodů je až 98,5 % a mohou se použít k převodu výkonu velkému až 5 MW. [13]

6.3 Uzávěry

Prakticky žádná MVE se neobejde bez uzávěru. Toto technologické zařízení slouží k zastavení průtoku vody do soustrojí vodní elektrárny. Tímto se umožní přístup obsluze k zařízením na revize a opravy. Uzávěry se dělí podle těchto základních kritérií:

- Podle charakteru provozu – regulační, neregulační.
- Podle funkce na díle – provozní, rychlouzávěry.

- Podle konstrukce – stavidlové, hradidlové, hradlové, klapkové, klínové, válcové, segmentové.
- Podle velikosti tlaku vody – trubní tlakové, kanálové o volné hladině. [13]

6.4 Generátory

Generátor je elektrický stroj, který přeměňuje mechanickou energii na elektrickou energii. U MVE mohou být použity generátory synchronní a asynchronní. [2]

Asynchronní generátory se však u malých vodních elektráren používají nejčastěji, jelikož jsou spolehlivé a jejich investiční a provozní náklady jsou nízké. Jako asynchronní generátor lze použít skoro každý asynchronní elektromotor s kotvou nakrátko. Od generátoru synchronního se liší provedením statorového a rotorového vinutí, výkonem a počtem otáček. Nazývají se asynchronní, protože otáčky rotoru a otáčky magnetického pole statoru nejsou stejné. [2]

Synchronní generátory se používají spíše u vodních elektráren s velkým výkonem, ale uplatnění se najde i u malých vodních elektráren. Nevýhoda je ta, že jsou dražší a nejsou tak jednoduché na provoz, jako asynchronní. Rychlost otáčení magnetického pole je u těchto generátorů shodná s rychlostí otáčení rotoru. [2]

7 Návrh malé vodní elektrárny

Parametry hydropotenciálu dané lokality jsem dostal od vedoucího bakalářské práce. Roční využití MVE odhaduji na 96 %. Počítám s roční odstávkou elektrárny na dva dny a také s odstávkami z důvodu údržby. Pro MVE navrhují dvě stejné turbíny, jelikož dokážou pracovat s větší účinností na středních až malých průtocích. Je to také z ekonomických důvodů, protože turbíny mají stejné součástky. V tom případě, kdyby došlo k poruše obou turbín, je možno sestavit alespoň jednu funkční.

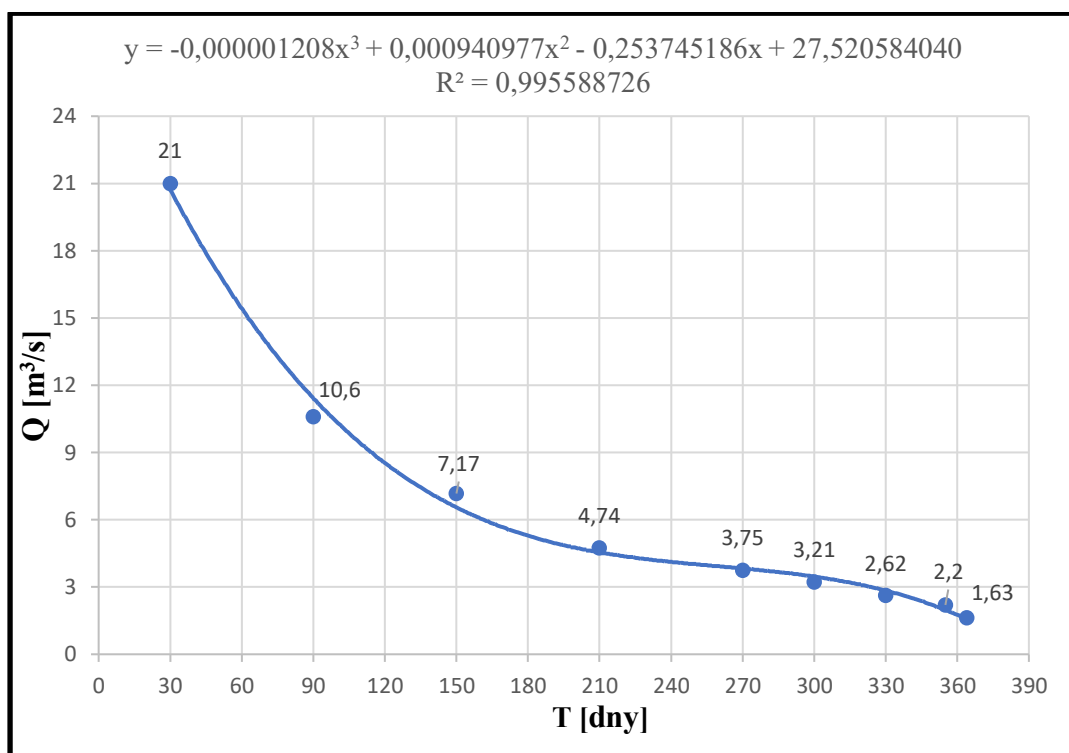
7.1 Hydropotenciál zadané lokality

- Jmenovitý spád $H = 3,5 \text{ m}$
- Asanační průtok $Q_{\text{asan}} = 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$
- Průtok je zadán odtokovou křivkou Tab. 7.1

T [dny]	30	90	150	210	270	300	330	355	364
Q [m ³ /s]	21	10,6	7,17	4,74	3,75	3,21	2,62	2,2	1,63

Tab. 7.1 Tabulka roční odtokové křivky

Z tabulky roční odtokové křivky jsem udělal v programu MS Excel graf (Obr. 7.1) pro lepší znázornění.



Obr. 7.1 Graf roční odtokové křivky

Pro pozdější výpočty je lepší počítání s roční odtokovou křivkou, která má průtoky v rozmezí 30-ti dnů. Proto celou tabulku roční odtokové křivky upravím. Všechny její hodnoty spočtu pomocí rovnice (7.1) polynomičské funkce třetího stupně, která vychází z grafu (Obr. 7.1). Hodnota spolehlivosti R^2 této funkce je 0,996.

$$Q = -1,208 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,000940977 \cdot x^2 - 0,253745186 \cdot x + 27,520584040 \quad (7.1)$$

$[m^3/s]$

Příklad výpočtu pro 60-ti denní průtok vychází z rovnice (7.1). Za neznámou x jsem dosadil daný počet dní.

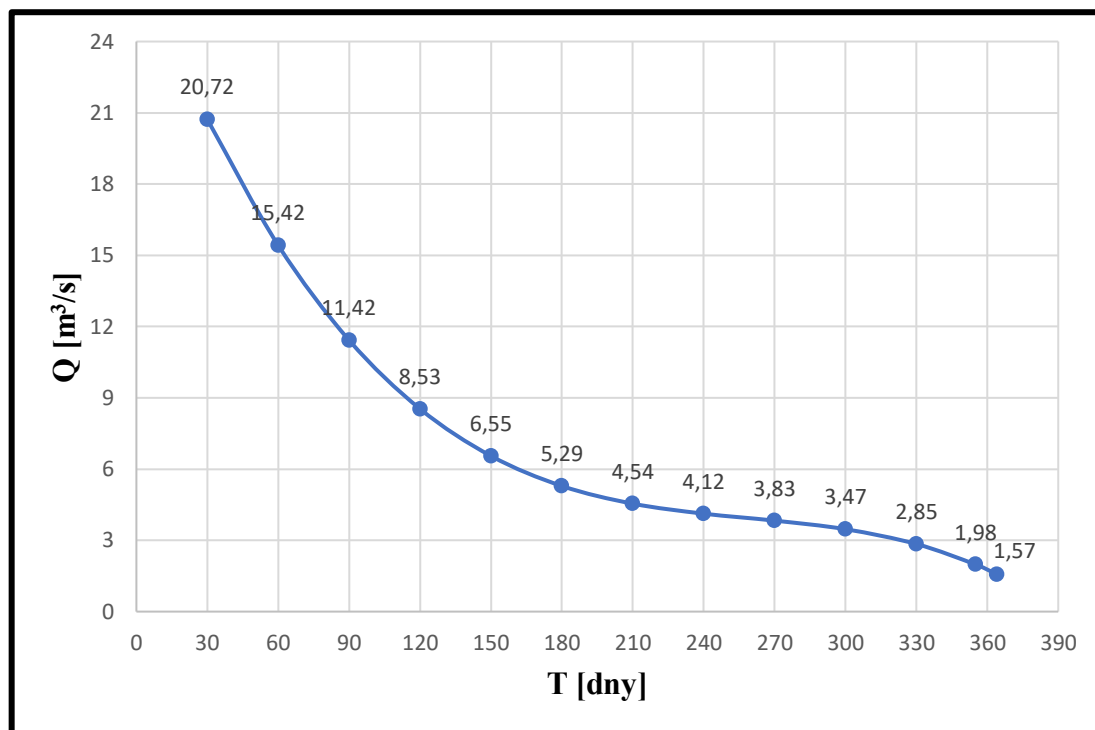
$$Q_{60} = -1,208 \cdot 10^{-6} \cdot 60^3 + 0,000940977 \cdot 60^2 - 0,253745186 \cdot 60 + 27,520584040 = 15,42 \text{ m}^3/\text{s}$$

Výsledné hodnoty jsem zapsal do tabulky (Tab. 7.2) a z ní jsem udělal graf (Obr. 7.2).

T [dny]	30	60	90	120	150	180	210
Q [m^3/s]	20,72	15,42	11,42	8,53	6,55	5,29	4,54

T [dny]	240	270	300	330	355	364
Q [m^3/s]	4,12	3,83	3,47	2,85	1,98	1,57

Tab. 7.2 Upravená tabulka roční odtokové křivky



Obr. 7.2 Upravený graf roční odtokové křivky

7.2 Volba turbíny

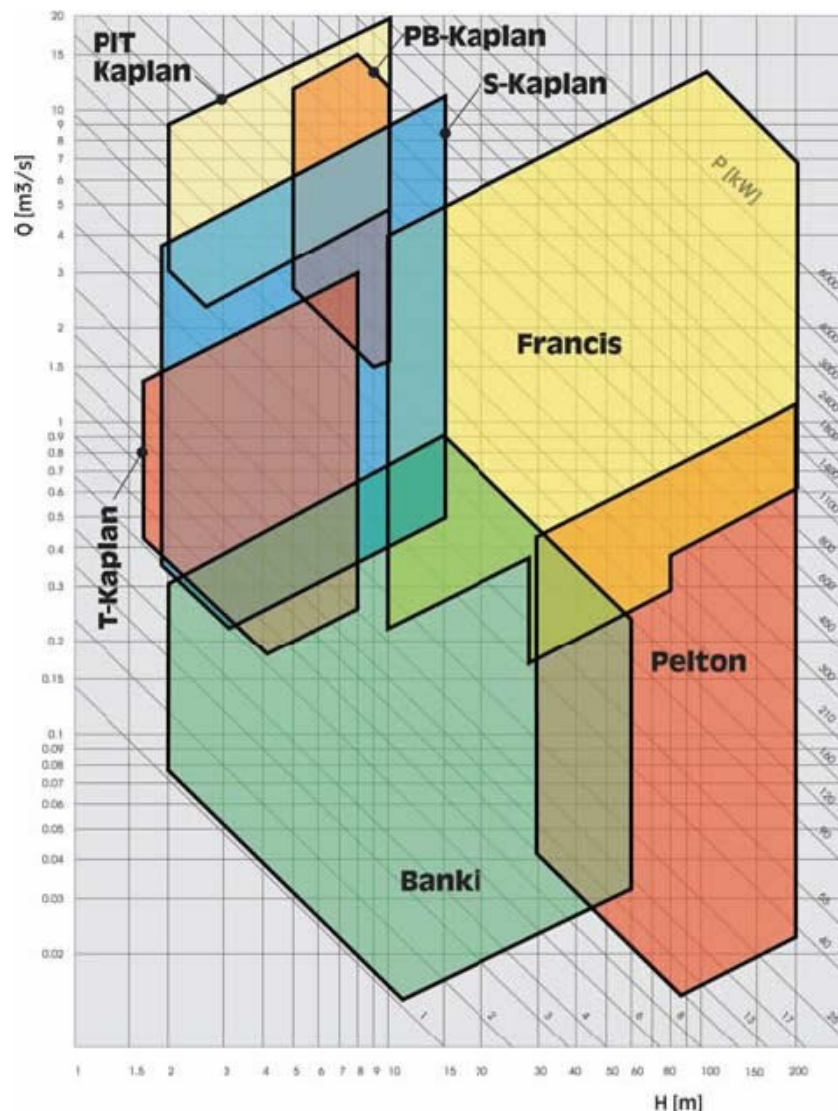
K dimenzování turbíny pro MVE se obvykle vybírá z 90-ti až 120-ti denního průtoku. Proto k určení výběrového průtoku použijí vzorec (7.2). Výsledek zaokrouhluje na dvě desetinná místa.

$$Q_{\text{výběr}} = \frac{(Q_{120} - Q_{\text{asan}}) + (Q_{90} - Q_{\text{asan}})}{2 \cdot N} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (7.2)$$

$$Q_{\text{výběr}} = \frac{(8,53 - 0,8) + (11,42 - 0,8)}{2 \cdot 2} = 4,59 \text{ m}^3/\text{s}$$

Kde: N je počet turbín.

Na obrázku (Obr. 7.3) jsou vyznačeny pracovní rozsahy základních turbín, které se používají u MVE. Kaplanova turbína vychází dobře pro průtok $Q_{\text{výběr}}$ a spád H . Vybírám si turbínu přímoproudou horizontální kolenovou turbínu typu S-KAPLAN od firmy ČKD TURBO TECHNICS. Turbína se hodí na spády od 2 do 6 m. Oběžné kolo turbíny má 3 lopatky. Rozváděcí lopatky jsou regulovatelné, které se natáčí do optimální polohy podle toho, jaký je průtok. [21, 24]



Obr. 7.3 H-Q diagram vodních turbín [11]

7.3 Určení hodnot z H-Q diagramu

Dále je nutno určit velikost oběžného kola, a to z H-Q diagramu naší vybrané turbíny (Obr. 7.4). Diagram je vykreslen v logaritmickém měřítku, tudíž je potřeba využít pravidel logaritmování pro určení přesných hodnot.

Základ logaritmu jsem získal z rovnice (7.3).

$$v = \log_x a - \log_x b \quad (7.3)$$

Kde:

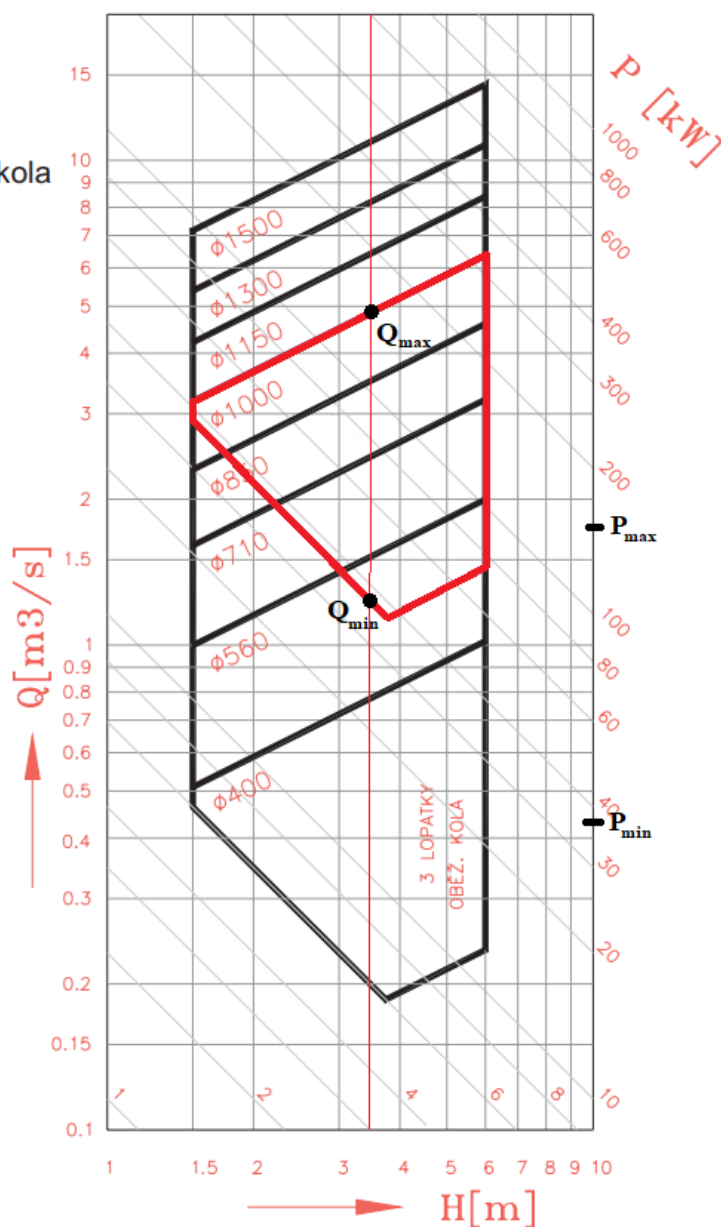
- v je vzdálenost mezi hodnotami na ose,
- x je základ logaritmu,
- a je hodnota na konci osy,
- b je hodnota na začátku osy.

Po upravení rovnice (7.3) dojdou k základu logaritmu.

$$v = \log_x \frac{a}{b} \rightarrow x^v = \frac{a}{b} \rightarrow x = \sqrt[v]{\frac{a}{b}} \quad (7.4)$$

DIAGRAM:

H Spád
Q Průtok
P Výkon
Φ Průměr ob. kola



Obr. 7.4 Diagram přímoproudé horizontální kolenové turbíny (S-KAPLAN) [24]

Z rovnice (7.4) vypočítám základ logaritmu osy pro výpočet průtoku, spádu a výkonu. Pro naměření vzdálenosti v jsem použil program MS Paint a naměřené hodnoty jsou v pixelech.

Základ logaritmu osy pro průtok.

$$x = \sqrt[713]{\frac{15}{0,1}} = 1,007$$

Základ logaritmu osy pro spád.

$$x = \sqrt[329]{\frac{10}{1}} = 1,007$$

Základ logaritmu osy pro výkon.

$$x = \sqrt[697]{\frac{1000}{1}} = 1,01$$

Z těchto základů logaritmů nyní zjistím, kde přesně se nachází bod v diagramu. Použiji na to vzorec (7.3), kde za neznámou a dosadím u průtoku hodnotu $Q_{\text{výběr}}$ a u spádu zadaný spád H . Výsledek je zaokrouhlen na celé číslo v pixelech.

Výpočet vzdálenosti pro průtok.

$$v = \log_{1,007} 4,59 - \log_{1,007} 0,1 = 549$$

Výpočet vzdálenosti pro spád.

$$v = \log_{1,007} 3,5 - \log_{1,007} 1 = 180$$

Z těchto dvou hodnot jsem sestavil na obrázku (Obr. 7.4) bod, podle kterého vyšel průměr oběžného kola 1 000 mm. Dále jsem vyznačil pracovní prostor turbíny, ze kterého se určí maximální a minimální průtok turbíny.

7.4 Výpočet průtoků

7.4.1 Průtok proudící přes jednu turbínu

K výpočtu průtoku se dostanu přes úpravu rovnice (7.3).

$$\log a = v \cdot \log x + \log b \tag{7.5}$$

$$Q = a = e^{v \cdot \ln x + \ln b} [m^3/s]$$

Pro výpočet minimálního a maximálního průtoku přes jednu turbínu použiji vzorec (7.5). Za v dosazuji výšku daného průtoku v pixelech.

$$Q_{\max} = e^{553 \cdot \ln 1,007 + \ln 0,1} = 4,73 \text{ m}^3/s$$

$$Q_{\min} = e^{357 \cdot \ln 1,007 + \ln 0,1} = 1,21 \text{ m}^3/s$$

7.4.2 Průtok toku

Maximální průtok toku (7.6) se rovná součtu maximálního možného průtoku dvou turbín a asanačního průtoku. Pokud bude průtok větší, musí jít přes jez. Jinak by mohlo dojít k poškození turbín.

$$Q_{max,tok} = Q_{max} \cdot 2 + Q_{asan} [m^3/s] \quad (7.6)$$

$$Q_{max,tok} = 4,73 \cdot 2 + 0,8$$

$$Q_{max,tok} = 10,26 \text{ m}^3/s$$

Minimální průtok toku (7.7) uvádí, jaký je nejmenší možný průtok, při kterém elektrárna ještě dokáže pracovat. Rovná se součtu minimálního průtoku jednou turbínou a asanačního průtoku.

$$Q_{min,tok} = Q_{min} + Q_{asan} [m^3/s] \quad (7.7)$$

$$Q_{min,tok} = 1,21 + 0,8$$

$$Q_{min,tok} = 2,01 \text{ m}^3/s$$

7.4.3 Výpočet teoretického a praktického využitelného průtoku

Teoretický využitelný průtok jsem spočítal rozdílem průtoku Q a asanačního průtoku Q_{asan} . Jedná se o průtok, který se může přivést do elektrárny a zároveň ve vodním toku zůstane biologická rovnováha. Praktický využitelný průtok jsem vypočítal jako součet teoretického průtoku daného a předchozího období, to celé poděleno dvěma. Je to hodnota průtoku, která by měla být dostupná během daného intervalu.

T	ΔT	Q	Q_{asan}	Q_{tv}	Q_{pv}
[dny]	[dny]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
30	28	20,72	0,8	19,92	9,46
60	30	15,42	0,8	14,62	9,46
90	30	11,42	0,8	10,62	9,46
120	30	8,53	0,8	7,73	9,18
150	30	6,55	0,8	5,75	6,74
180	30	5,29	0,8	4,49	5,12
210	30	4,54	0,8	3,74	4,12
240	30	4,12	0,8	3,32	3,53

270	30	3,83	0,8	3,03	3,18
300	30	3,47	0,8	2,67	2,85
330	30	2,85	0,8	2,05	2,36
355	25	1,98	0,8	1,18	1,62
364	9	1,57	0,8	0,77	0,98

Tab. 7.3 Průtoky

- Kde: T je počet dnů k odpovídajícímu průtoku Q,
 ΔT je počet dní v intervalu,
Q je průtok z roční odtokové křivky,
 Q_{asan} je asanační průtok,
 Q_{tv} je teoretický využitelný průtok pro MVE pro spodní intervalu daného odtokovou křivkou,
 Q_{pv} je průměrný prakticky využitelný průtok pro MVE v období daného ΔT .

V tabulce (Tab. 7.3) je vidno, že v rozmezí dnů 90–120 se praktický využitelný průtok dostane na maximální možný průtok elektrárnou.

Příklad výpočtu teoretického a praktického využitelného průtoku. Pro znázornění jsem vybral interval dnů 355–364.

$$Q_{tv(364)} = Q_{(364)} - Q_{asan} [m^3/s] \quad (7.8)$$

$$Q_{tv(364)} = 1,57 - 0,8$$

$$Q_{tv(364)} = 0,77 m^3/s$$

$$Q_{pv(364)} = \frac{Q_{tv(364)} + Q_{tv(355)}}{2} [m^3/s] \quad (7.9)$$

$$Q_{pv(364)} = \frac{0,77 + 1,18}{2}$$

$$Q_{pv(364)} = 0,98 m^3/s$$

Z tabulky (Tab. 7.3) je vidno, že někdy mezi dny 330–355 klesne praktický využitelný průtok pod hodnotu minimálního průtoku jedné turbíny. To tedy znamená, že MVE nebude fungovat. Abych zjistil, kdy v tomto 25-ti denním intervalu elektrárna bude mít zase dostatečný průtok pro svůj provoz, tak dané hodnoty vložím do grafu (Obr. 7.5).

Pro vykreslení do grafu jsem použil hodnoty teoretického využitelného průtoku daného intervalu. Výsledkem je spojnice trendu s nejvyšší možnou hodnotou spolehlivosti. Pomocí této rovnice regrese (7.10) lze tedy přesně zjistit, kdy bude elektrárna zase provozuschopná.

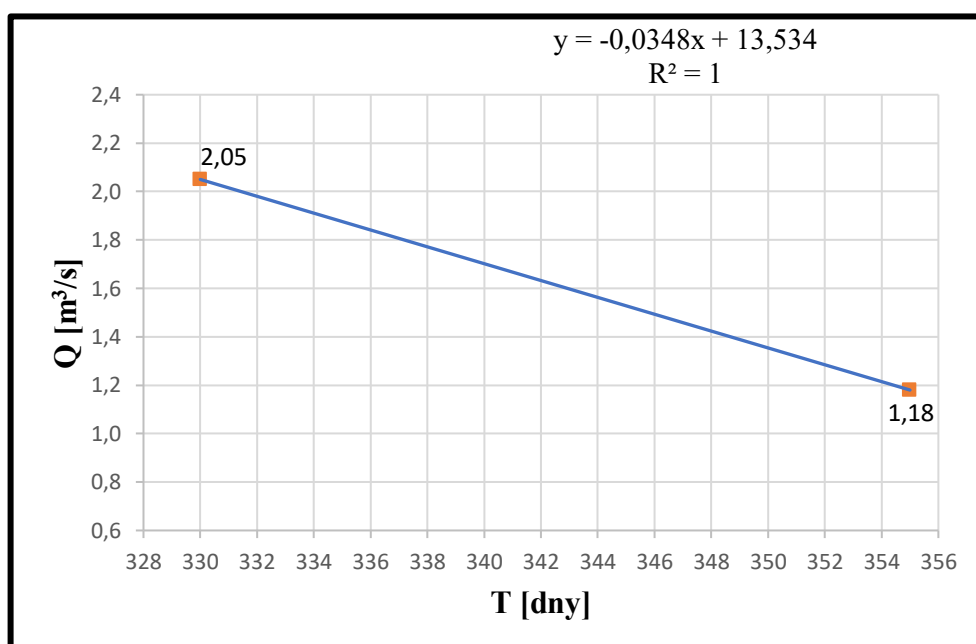
$$y = -0,0348 \cdot x + 13,534 \quad (7.10)$$

Z grafu lze odhadnout, že to bude asi 354. den. Do rovnice (7.10) tedy dám za x tento odhad a zjistím, zdali výsledek y bude větší nebo roven $Q_{\min} = 1,21 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$y = -0,0348 \cdot 354 + 13,534$$

$$y = 1,2148$$

Výsledek je větší, takže 354. den bude mít elektrárna zase dostatečný průtok pro svůj provoz. Zbylých 10 dní v roce nebude MVE fungovat.



Obr. 7.5 Vykreslení do grafu

Tabulku (Tab. 7.3) upravuji a rozšiřuji o den, kdy bude v toku dostatečný průtok a elektrárna bude znovu v provozu. Pro dny 354 a 355 jsem vypočítal teoretický a praktický využitelný průtok podle rovnic (7.8) a (7.9).

T	ΔT	Q	Q_{asan}	Q_{tv}	Q_{pv}
[dny]	[dny]	$[\text{m}^3/\text{s}]$	$[\text{m}^3/\text{s}]$	$[\text{m}^3/\text{s}]$	$[\text{m}^3/\text{s}]$
354	24	2,01	0,8	1,21	1,63
355	1	1,98	0,8	1,18	1,20

Tab. 7.4 Rozšířená tabulka o průtok

7.5 Určení výkonů z vypočtených průtoků

K určení výpočtu výkonů se dostanu úpravou rovnice (7.3). Základ logaritmu pro osu výkonu jsem vypočítal dřív v kapitole 7.3.

$$P = a = e^{v \cdot \ln x + \ln b} [kW] \quad (7.11)$$

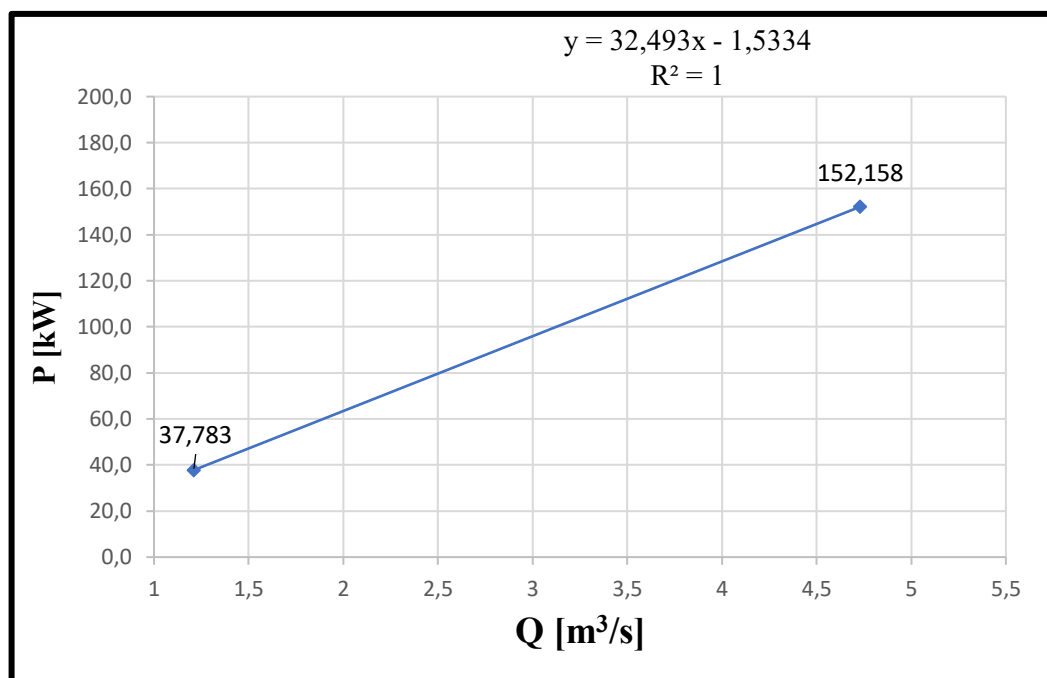
Výkon pro maximální průtok jednou turbínou 4,73 m³/s.

$$P_{max} = e^{505 \cdot \ln 1,01 + \ln 1} = 152,158 \text{ kW}$$

Výkon pro minimální průtok jednou turbínou 1,21 m³/s.

$$P_{min} = e^{365 \cdot \ln 1,01 + \ln 1} = 37,783 \text{ kW}$$

Pro lepší znázornění jsem z hodnot průtoků a výkonů vytvořil graf (Obr. 7.6). Pro vytvoření rovnice jsem zvolil lineární regresi. Pomocí této rovnice je možno si vypočítat jaký bude výkon jedné turbíny při daném průtoku.



Obr. 7.6 Graf závislosti výkonu na průtoku

Účinnost jednotlivých výkonů vypočítám pomocí rovnice (7.12).

$$\eta = \frac{P}{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q} \cdot 100[\%] \quad (7.12)$$

Kde: P je výkon,
 ρ je hustota vody,
 g je tíhové zrychlení,

H je jmenovitý spád,

Q je průtok.

Účinnost pro maximální výkon.

$$\eta = \frac{P_{max}}{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q_{max}} \cdot 100 [\%]$$

$$\eta = \frac{152158}{1000 \cdot 9,81 \cdot 3,5 \cdot 4,73} \cdot 100$$

$$\eta = 93,69 \%$$

Účinnost pro minimální výkon.

$$\eta = \frac{P_{min}}{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q_{min}} \cdot 100 [\%]$$

$$\eta = \frac{37783}{1000 \cdot 9,81 \cdot 3,5 \cdot 1,21} \cdot 100$$

$$\eta = 90,94 \%$$

7.6 Produkce elektrické energie

7.6.1 Množství vyrobené energie v jednotlivých intervalech

T	ΔT	Q	Q _{pV}	P	E _{el}	E _{elsk}	η	t _p
[dny]	[dny]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[kW]	[kWh]	[kWh]	[%]	[-]
30	28	20,72	9,46	304,3	204486	196307	93,68	2
60	30	15,42	9,46	304,3	219093	210329	93,68	2
90	30	11,42	9,46	304,3	219093	210329	93,68	2
120	30	8,53	9,18	295,0	212425	203928	93,65	2
150	30	6,55	6,74	215,9	155458	149240	93,30	2
180	30	5,29	5,12	163,3	117558	112856	92,88	2
210	30	4,54	4,12	130,6	94046	90285	92,45	2
240	30	4,12	3,53	111,6	80360	77146	92,09	2
270	30	3,83	3,18	100,1	72055	69173	91,80	2
300	30	3,47	2,85	89,5	64452	61874	91,48	2
330	30	2,85	2,36	75,1	54100	51936	92,73	1
354	24	2,01	1,63	51,4	29618	28433	91,88	1
355	1	1,98	1,20	0	0	0	0	0
364	9	1,57	0,98	0	0	0	0	0

Tab. 7.5 Produkce elektrické energie

Kde:	T	je počet dnů k odpovídajícímu průtoku Q,
	ΔT	je počet dní v intervalu,
	Q	je průtok z roční odtokové křivky,
	Q_{pv}	je průměrný prakticky využitelný průtok pro MVE v období daného ΔT ,
	P	je výkon MVE,
	E_{el}	je teoretické množství vyprodukované energie za dané období bez odstávek,
	E_{elsk}	je skutečné množství vyprodukované energie za dané období s odstávkou na údržbu,
	η	je účinnost turbín,
	t_p	je počet turbín v provozu.

V tabulce (Tab. 7.5) jsem vypočítal pro každý interval výkon, produkci elektrické energie a účinnost turbín. Účinnost turbín se pohybuje v rozmezí 91,48–93,68 %.

Pro příklad výpočtu hodnot z tabulky (Tab. 7.5) vyberu první řádek.

Pro výpočet výkonu jsem použil vzorec z grafu (Obr. 7.6) a rozšířil jsem ho o součin s počtem turbín v provozu.

$$P = 32,493 \cdot Q_{pv} - 1,5334 \cdot t_p [kW] \quad (7.13)$$

$$P = 32,493 \cdot 9,46 - 1,5334 \cdot 2$$

$$P = 304,3 \text{ kW}$$

Kde: t_p je počet turbín v provozu.

Hodnotu teoretického množství vyprodukované energie jsem zjistil vynásobením hodin v daném období ΔT a výkonu MVE.

$$E_{el} = 24 \cdot \Delta T \cdot P [kWh] \quad (7.14)$$

$$E_{el} = 24 \cdot 28 \cdot 304,3$$

$$E_{el} = 204486 \text{ kWh}$$

Hodnotu skutečného množství vyprodukované energie jsem zjistil v rovnici (7.15) vynásobením teoretického množství energie a ročním využitím MVE. Je to vyprodukovaná elektrická energie za dané období, ve které se počítá s odstávkami.

$$E_{elsk} = E_{el} \cdot r_{mve} [kWh] \quad (7.15)$$

$$E_{elsk} = 204486 \cdot 0,96$$

$$E_{elsk} = 196307 kWh$$

Kde: r_{mve} je součinitel ročního využití MVE.

Účinnost turbín jsem spočítal pomocí vzorce (7.12).

$$\eta = \frac{P}{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q_{pv}} \cdot 100 [\%]$$

$$\eta = \frac{304300}{1000 \cdot 9,81 \cdot 3,5 \cdot 9,46} \cdot 100$$

$$\eta = 93,68 \%$$

Pro určení počtu turbín v provozu jsem věděl, že minimální průtok přes jednu turbínu je 1,21 m³/s. Pokud tedy nebude tento minimální průtok, tak nebude v provozu žádná turbína. Pokud praktický využitelný průtok dosáhne hodnot minimálního průtoku jedné turbíny, tak se spustí první turbína. Jakmile bude průtok větší jak maximální průtok jedné turbíny, spustí se druhá turbína.

7.6.2 Množství vyrobené energie za rok

Množství vyrobené energie za rok získám sečtením E_{elsk} v každém intervalu. Je to reálná energie, kterou MVE vyrobí za celý rok.

$$E_{elskrok} = \sum E_{elsk} [kWh] \quad (7.16)$$

$$E_{elskrok} = 1461835 kWh$$

7.6.3 Vlastní spotřeba

Vodní elektrárna spotřebuje pro svůj chod vlastní energii. Hlavní spotřebou energie jsou systémy pro provoz elektrárny, osvětlení, zabezpečení apod. Pro výpočet se počítá s jedním procentem z celkového množství vyrobené energie za rok.

$$E_{pr} = \frac{E_{elskrok}}{100} [kWh] \quad (7.17)$$

$$E_{pr} = \frac{1461835}{100}$$

$$E_{pr} = 14618 kWh$$

7.7 Odhad investičních nákladů

Pro odhad investičních nákladů musím vycházet z vyhlášky č. 296/2015 Sb. Tato vyhláška se zabývá stanovením technicko-ekonomických parametrů a doby životnosti výroben elektřiny. Doba životnosti výroby elektřiny je tedy podle této vyhlášky 30 let.

Součinitel využití instalovaného výkonu (7.18).

$$K_{cr} = \frac{E_{elskrok}}{h_{rok} \cdot P_i} [-] \quad (7.18)$$

$$K_{cr} = \frac{1461835}{8760 \cdot 304,3}$$

$$K_{cr} = 0,548$$

Kde: $E_{elskrok}$ je množství vyrobené energie za rok,

P_i je instalovaný výkon,

h_{rok} je počet hodin za rok.

Roční využití instalovaného výkonu (7.19).

$$R_{vp} = K_{cr} \cdot h_{rok} [kWh/kW_e] \quad (7.19)$$

$$R_{vp} = 0,548 \cdot 8760$$

$$R_{vp} = 4800 \text{ kWh}/kW_e$$

Z vyhlášky č. 266/2016 Sb. zjišťuji, že mé hodnotě ročního využití instalovaného výkonu malé vodní elektrárny v nové lokalitě odpovídají měrné investiční náklady ve výši 130 000 Kč/kW_e. Také se dozvídám, že roční využití instalovaného výkonu je na nejvyšší možné horní hranici ročního využití instalovaného výkonu, a to 4 800 kWh/kW_e. Informace viz tabulka níže (Tab. 7.6). [23]

Charakteristika výroby elektřiny	Měrné investiční náklady [Kč/kW _e]	Průměrné roční využití instalovaného výkonu za dobu životnosti [kWh _e /kW _e]	Horní hranice rozsahu ročního využití instalovaného výkonu [kWh _e /kW _e]
Malá vodní elektrárna v nových lokalitách	< 130000	> 4000	4800
Malá vodní elektrárna ve stávajících lokalitách nebo rekonstruovaná	< 105000	> 4000	4800

Tab. 7.6 Charakteristika výroby elektřiny [23]

Celkové investiční náklady se spočtou jako součin měrných investičních nákladů a instalovaného výkonu (7.20).

$$IN = MIN \cdot P_i [Kč] \quad (7.20)$$

$$IN = 130000 \cdot 304,3$$

$IN = 39559000 \text{ Kč}$

Kde: IN jsou investiční náklady,

MIN jsou měrné investiční náklady.

7.8 Stanovení doby návratnosti a příjmů

Z tabulky níže (Tab. 7.7) lze vyčíst výkupní cenu elektřiny pro MVE v nových lokalitách pro datum uvedení elektrárny do provozu v roce 2020. Výkupní cena energie je v tabulce zvýrazněna a činí 2 741 Kč/MWh. Pomocí této hodnoty lze zjistit, za jak dlouho se investované finance vrátí a jaké budou roční příjmy. Z tabulky je taky vidět klesající trend výkupní ceny. [22]

ř./sl.	Podporovaný druh energie	Datum uvedení výroby do provozu		Jednotarifní pásmo provozování		Dvoutarifní pásmo provozování	
		od (včetně)	do (včetně)	Výkupní ceny [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]	
						VT	NT
a	b	c	j	k	n	o	
100	Malá vodní elektrárna ve stávajících lokalitách	-	31.12.2004	2 239	1 259	1 330	1 218
101		1.1.2005	31.12.2013	2 870	1 890	2 100	1 780
102		1.1.2014	31.12.2014	2 814	1 834	-	-
103		1.1.2015	31.12.2015	2 759	1 779	-	-
104		1.1.2016	31.12.2016	2 705	1 725	-	-
105		1.1.2017	31.12.2017	2 349	1 369	-	-
106		1.1.2018	31.12.2018	2 303	1 323	-	-
107		1.1.2019	31.12.2019	2 258	1 278	-	-
108		1.1.2020	31.12.2020	2 214	1 234	-	-
110	Rekonstruovaná malá vodní elektrárna	-	31.12.2013	2 870	1 890	2 100	1 780
111		1.1.2014	31.12.2014	2 814	1 834	-	-
112		1.1.2015	31.12.2015	2 759	1 779	-	-
113		1.1.2016	31.12.2016	2 705	1 725	-	-
114		1.1.2017	31.12.2017	2 349	1 369	-	-
115		1.1.2018	31.12.2018	2 303	1 323	-	-
116		1.1.2019	31.12.2019	2 258	1 278	-	-
117		1.1.2020	31.12.2020	2 214	1 234		
120	Malá vodní elektrárna v nových lokalitách	1.1.2006	31.12.2007	3 189	2 209	2 430	2 093
121		1.1.2008	31.12.2009	3 375	2 395	-	-
122		1.1.2010	31.12.2010	3 668	2 688	-	-
123		1.1.2011	31.12.2011	3 586	2 606	2 610	2 689
124		1.1.2012	31.12.2012	3 737	2 757	-	-
125		1.1.2013	31.12.2013	3 711	2 731	-	-
126		1.1.2014	31.12.2014	3 638	2 658	-	-
127		1.1.2015	31.12.2015	3 567	2 587	-	-
128		1.1.2016	31.12.2016	3 322	2 342	-	-
129		1.1.2017	31.12.2017	2 909	1 929	-	-
130		1.1.2018	31.12.2018	2 852	1 872	-	-
131		1.1.2019	31.12.2019	2 796	1 816	-	-
132	1.1.2020	31.12.2020	2 741	1 761			

Tab. 7.7 Výkupní ceny elektřiny pro malé vodní elektrárny [22]

Roční příjem spočítám pomocí vzorce (7.21).

$$RP = (E_{elskrok} - E_{pr}) \cdot VC [Kč] \quad (7.21)$$

$$RP = (1461835 - 14618) \cdot 2,741$$

$$RP = 3966822 \text{ Kč}$$

Kde: RP je roční příjem z vyrobené energie,

VC je výkupní cena.

Dobu návratnosti spočítám jako podíl investičních nákladů a ročního příjmu z vyrobené energie (7.22).

$$DN = \frac{IN}{RP} [rok] \quad (7.22)$$

$$DN = \frac{39559000}{3966822}$$

$$DN = 10 \text{ let}$$

Celkový příjem po dobu předpokládané životnosti malé vodní elektrárny (7.23).

$$CP = RP \cdot Z [Kč] \quad (7.23)$$

$$CP = 3966822 \cdot 30$$

$$CP = 119004660 \text{ Kč}$$

Kde: Z je předpokládaná doba životnosti výrobní elektřiny.

Zisk zjistím odečtem investičních nákladů od celkového příjmu (7.24).

$$ZS = CP - IN [Kč] \quad (7.24)$$

$$ZS = 119004660 - 39559000$$

$$ZS = 79445660 \text{ Kč}$$

Za 10 let by malá vodní elektrárna vydělala na svoji investici. Celkově by za 30 let od doby uvedení do provozu MVE vydělala 119 mil. Kč, z toho by byl 79,4 mil. Kč zisk. Tyto výsledky jsou pouze odhadem, jelikož jsou vypočteny s výkupní cenou energie z roku 2020. Výkupní cena se však může každým rokem měnit. Musí se taky počítat s provozními náklady např. na údržbu, revize apod. Podrobnější přehled financí v jednotlivých letech lze vidět níže v tabulce (Tab. 7.8).

	Náklady	Celkový příjem	Návratnost	Zisk
Rok	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
1	39559000	3966822	35592178	-
2	39559000	7933644	31625356	-
3	39559000	11900466	27658534	-
4	39559000	15867288	23691712	-
5	39559000	19834110	19724890	-
6	39559000	23800932	15758068	-
7	39559000	27767754	11791246	-
8	39559000	31734576	7824424	-
9	39559000	35701398	3857602	-
10	39559000	39668220	-	109220
11	39559000	43635042	-	4076042
12	39559000	47601864	-	8042864
13	39559000	51568686	-	12009686
14	39559000	55535508	-	15976508
15	39559000	59502330	-	19943330
16	39559000	63469152	-	23910152
17	39559000	67435974	-	27876974
18	39559000	71402796	-	31843796
19	39559000	75369618	-	35810618
20	39559000	79336440	-	39777440
21	39559000	83303262	-	43744262
22	39559000	87270084	-	47711084
23	39559000	91236906	-	51677906
24	39559000	95203728	-	55644728
25	39559000	99170550	-	59611550
26	39559000	103137372	-	63578372
27	39559000	107104194	-	67545194
28	39559000	111071016	-	71512016
29	39559000	115037838	-	75478838
30	39559000	119004660	-	79445660

Tab. 7.8 Finanční přehled po dobu životnosti elektrárny

7.9 Enviromentální zhodnocení

Pokud se k výrobě elektrické energie rozhodneme použít MVE, bude ovzduší méně znečištěno než v případě použití např. uhelných elektráren. V tabulce (Tab. 7.9) jsou hodnoty emisních faktorů podle vyhlášky č. 480/2012 Sb.

VOC	CO	NO _x	SO ₂	TZL	PM _{2,5}	CO ₂
[kg/MWh]	[kg/MWh]	[kg/MWh]	[kg/MWh]	[kg/MWh]	[kg/MWh]	[kg/GJ]
0,00249	0,08621	0,56764	0,84124	0,03680	0,02208	281

Tab. 7.9 Emisní faktory [16]

VOC	CO	NO _x	SO ₂	TZL	PM _{2,5}	CO ₂
[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
3,64	126,02	829,80	1229,75	53,80	32,28	1478903

Tab. 7.10 Ušetřené emise

Kde: VOC jsou těkavé organické látky,
CO je oxid uhelnatý,
NO_x jsou oxidy dusíku,
SO₂ je oxid siřičitý,
TZL jsou tuhé znečišťující látky,
PM_{2,5} jsou pevné částice menší než 2,5 μm,
CO₂ je oxid uhličitý.

V tabulce (Tab. 7.10) jsou vidět roční hodnoty znečišťujících látek, které nebudou vyprodukovány v případě použití malé vodní elektrárny pro výrobu elektrické energie.

Příklad výpočtu hodnoty pro CO₂. Převod roční vyprodukované energie z kWh na GJ.

$$E_{el\text{skrok}} = 1461835 \text{ kWh}$$

$$E_{el\text{skrok}} = 1461835 \cdot 3,6 = 5262606 \text{ MJ} = 5263 \text{ GJ}$$

V rovnici (7.25) je výpočet o kolik kilogramů oxidu uhličitého ušetříme ovzduší.

$$CO_{2u} = E_{el\text{skrok}} \cdot CO_2 \text{ [kg]} \quad (7.25)$$

$$CO_{2u} = 5263 \cdot 281$$

$$CO_{2u} = 1478903 \text{ kg}$$

8 Závěr

Bakalářská práce je rozdělena na rešeršní část a praktickou část. V rešeršní části práce jsem se zabýval základními zdroji energie, které se rozdělují na obnovitelné a neobnovitelné. V další kapitole jsem se zabíral výrobou elektrické energie v České republice a využitím vodní energie na našem území. Z grafu podílu paliv a technologií na výrobě elektřiny je vidno, že v České republice bylo v roce 2018 vyprodukováno pomocí vodní energie pouze 2 % elektrické energie. Dále jsem rozdělil vodní elektrárny, do kterých právě spadá i malá vodní elektrárna. Víc jsem se věnoval stavebně hydraulickým a strojním zařízením malé vodní elektrárny.

V praktické části jsem navrhl pro hydropotenciál vybrané lokality vhodný počet turbín a jejich typ. Zvolil jsem dvě přímoproudé horizontální kolenové turbíny (S-KAPLAN) o stejném průměru oběžného kola 1 000 mm. Zvolil jsem dvě stejné z toho důvodu, jelikož dosahují velkých účinností při malém až středním průtoku. Taky když nastane porucha na obou turbínách, tak je větší pravděpodobnost, že se dokáže zprovoznit aspoň jedna funkční turbína.

V závěru praktické části jsem provedl energetické, ekonomické a enviromentální zhodnocení. Navržená MVE má instalovaný výkon 304,3 kW. Za rok by byla schopna dodat do sítě 1 462 GWh elektrické energie.

Odhadovaná investice elektrárny je 39,6 mil. Kč. Roční příjem elektrárny by byl 4 mil. Kč, tím pádem by se investice vrátila za 10 let. Předpokládaná životnost elektrárny je 30 let a za tuto dobu by zisk byl 79,4 mil. Kč.

Pokud by se upřednostnila výroba elektřiny v MVE namísto v uhelné elektrárně, ovzduší by bylo za rok ušetřeno o:

- 3,63 kg VOC,
- 126,02 kg CO,
- 829,8 kg NO_x,
- 1 229,75 kg SO₂,
- 53,8 kg TZL,
- 32,28 kg PM_{2,5},
- 1 478 903 kg CO₂.

9 Seznam použité literatury

- [1] KARMINSKÝ, Jaroslav a Mojmír VRTEK. *Obnovitelné zdroje energie*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 1998. ISBN 80-7078-445-8.
- [2] BEDNÁŘ, Josef. *Turbíny: (malé vodní elektrárny)*. Českovice: Marcela Bednářová, c2013. ISBN 978-80-905437-0-6.
- [3] *Energetika – vybrané pojmy (I), TZB-INFO* [online]. [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <<https://energetika.tzb-info.cz/9668-energetika-vybrane-pojmy-i>>
- [4] *Energetická účinnost v průmyslu, EUROPEAN COMMISSION* [online]. [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/iuses_student_handbook_industry_cs.pdf>
- [5] *Roční zpráva o provozu ES ČR 2018, Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf/1420388b-8eb6-4424-9ad9-c06a57b5326c>
- [6] *Tisková zpráva, Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/-/tz_statistiky_2018?inheritRedirect=true>
- [7] *Století elektřiny v Česku, TRÍPÓL* [online]. [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <<https://www.3pol.cz/cz/rubriky/bez-zarazeni/2263-stoleti-elekriny-v-cesku-ceskoslovensku>>
- [8] *Jak funguje vodní elektrárna?, CARBOUNION* [online]. [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <<https://www.carbounion.cz/radce/jak-funguje-vodni-elektrarna>>
- [9] *O vodní energetice, ČEZ* [online]. [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <<https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/informace-o-vodni-energetice>>
- [10] *Nejvyužívanější obnovitelný zdroj světa. Vodní elektrárny jako důležitý zdroj u nás i ve světě, OENERGETICE* [online]. [cit. 06.05.2020]. Dostupné též z: <<https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/nejvyuzivanejsi-obnovitelny-zdroj-sveta-vodni-elektrarny-jako-dulezity-zdroj-u-nas-i-ve-svete>>
- [11] *Vodní elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR, OENERGETICE* [online]. [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <<https://oenergetice.cz/elektrina/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni>>
- [12] *Malá vodní elektrárna: Kolik elektřiny vyrobí? Vyplatí se?, NAZELENO* [online]. [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <<https://www.nazeleno.cz/energie/vodni-energie/mala-vodni-elektrarna-kolik-elekriny-vyrobi-vyplati-se.aspx>>

- [13] HOLATA, Miroslav, GABRIEL, Pavel, ed. *Malé vodní elektrárny: projektování a provoz*. Praha: Academia, 2002. Česká matice technická, č. spisu 492, roč. 107 (2002). ISBN 80-200-0828-4.
- [14] *Energie vody, ENERGETIKA* [online]. [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <<https://energetika.cz/index.php?id=143>>
- [15] STUDENÍK, Jiří a SVITAVSKÝ, Michal. *Energie větru, vody, biomasy*. Code Creator s.r.o., 2014. ISBN 978-80-88058-08-3. [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <<https://publi.cz/books/90/Cover.html>>
- [16] Vyhláška č. 480/2012 Sb., *vyhláška o energetickém auditu a energetickém posudku* [online]. [cit. 12.05.2020]. Dostupné z: <<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-48>>
- [17] *Abeceda malých vodních pohonů, MVE ENERGETIKA* [online]. [cit. 10.05.2020]. Dostupné z: <<http://mve.energetika.cz>>
- [18] *Peltonova turbína, MVE ENERGETIKA* [online]. [cit. 10.05.2020]. Dostupné z: <<http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/pelton.htm>>
- [19] *Bánkiho turbína, MVE ENERGETIKA* [online]. [cit. 10.05.2020]. Dostupné z: <<http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/banki.htm>>
- [20] *Francisova horizontální turbína, MVE ENERGETIKA* [online]. [cit. 10.05.2020]. Dostupné z: <<http://mve.energetika.cz/pretlakoveturbiny/francis-horiz.htm>>
- [21] *Kaplanova S-turbína, MVE ENERGETIKA* [online]. [cit. 10.05.2020]. Dostupné z: <<http://mve.energetika.cz/pretlakoveturbiny/kaplan-s.htm>>
- [22] *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu, Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 10.05.2020]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/documents/10540/5438957/N%C3%A1vrh+CR_POZE_2020_VKP.pdf/f3f8785c-57ea-4a13-bcdf-ae5041e38968>
- [23] Vyhláška č. 296/2015 Sb., *vyhláška o technicko-ekonomických parametrech* [online]. [cit. 10.05.2020]. Dostupné z: <<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-296>>
- [24] *Přímoproudé horizontální kolenové turbíny (S-KAPLAN), ČKD TURBO TECHNICS*

10 Seznam obrázků

Obr. 2.1 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny v ČR za rok 2018	13
Obr. 5.1 Schéma vodního díla s turbínovou kašnou a tlakovým přivaděčem.....	18
Obr. 5.2 Schéma hrubých a jemných česlí	19
Obr. 6.1 Schéma lopatkového vodního kola s horním nátokem	21
Obr. 6.2 Schéma Peltonovy turbíny	22
Obr. 6.3 Schéma Bánkiho turbíny	23
Obr. 6.4 Schéma Francisovy horizontální turbíny	24
Obr. 6.5 Schéma Kaplanovy S-turbíny	25
Obr. 7.1 Graf roční odtokové křivky	28
Obr. 7.2 Upravený graf roční odtokové křivky	29
Obr. 7.3 H-Q diagram vodních turbín	30
Obr. 7.4 Diagram přímoproudé horizontální kolenové turbíny (S-KAPLAN)	31
Obr. 7.5 Vykreslení do grafu.....	35
Obr. 7.6 Graf závislosti výkonu na průtoku	36

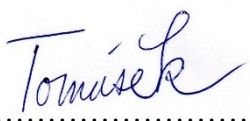
11 Seznam tabulek

Tab. 7.1 Tabulka roční odtokové křivky	27
Tab. 7.2 Upravená tabulka roční odtokové křivky	28
Tab. 7.3 Průtoky	34
Tab. 7.4 Rozšířená tabulka o průtok	35
Tab. 7.5 Produkce elektrické energie	37
Tab. 7.6 Charakteristika výroby elektřiny	40
Tab. 7.7 Výkupní ceny elektřiny pro malé vodní elektrárny	41
Tab. 7.8 Finanční přehled po dobu životnosti elektrárny	43
Tab. 7.9 Emisní faktory	44
Tab. 7.10 Ušetřené emise	44

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Mojmíru Vrtkovi, Ph. D za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat.

V Ostravě dne 18. května 2020.



.....

Podpis studenta